

ФАНО РОССИИ
УрО РАН
ИМАШ УрО РАН
ИФПМ СО РАН

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ



МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Екатеринбург
21-25 мая 2018 г.

Федеральное агентство научных организаций
Российский фонд фундаментальных исследований
Уральское отделение Российской академии наук
Институт машиноведения УрО РАН
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

**XII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА
МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»**

Сборник материалов

(Екатеринбург, 21–25 мая 2018 г.)

Екатеринбург
ИМАШ УрО РАН
2018

УДК 620.17+620.16:620.18+620.19:620.179

ББК 34

Оргкомитет:

Сопредседатели оргкомитета:

Горкунов Э.С. *Екатеринбург, Россия*; Панин В.Е. *Томск, Россия*; Сундер Р. *Бангалор, Индия*.

Члены оргкомитета:

Батаев А.А. *Новосибирск, Россия*

Беляев А.К. *Санкт-Петербург, Россия*

Богданович А.В. *Минск, Беларусь*

Брезинова Ж. *Кошице, Словакия*

Буренин А.А. *Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Вухерер Т. *Марибор, Словения*

Головин С.В. *Новосибирск, Россия*

Горячева И.Г. *Москва, Россия*

Гутманас Э. *Хайфа, Израиль*

Дегтярь В.Г. *Миасс, Россия*

Индейцев Д.А. *Санкт-Петербург, Россия*

Иршик Х. *Линц, Австрия*

Ломакин Е.В. *Москва, Россия*

Марущак П.О. *Тернополь, Украина*

Матвеев В.П. *Пермь, Россия*

Мену А. *Касабланка, Марокко*

Миховски М. *София, Болгария*

Морозов Н.Ф. *Санкт-Петербург, Россия*

Муллюков Р.Р. *Уфа, Россия*

Прентковскис О. *Вильнюс, Литва*

Псахье С.Г. *Томск, Россия*

Смирнов С.В. *Екатеринбург, Россия*

Фомин В.М. *Новосибирск, Россия*

Ченцов А.Г. *Екатеринбург, Россия*

Шиплюк А.Н. *Новосибирск, Россия*

Якушенко Е.И. *Санкт-Петербург, Россия*

Программный комитет:

Председатель: Смирнов С.В. *Екатеринбург*

Члены программного комитета:

Буров С.В. *Екатеринбург*

Гладковский С.В. *Екатеринбург*

Дементьев В.Б. *Ижевск*

Коновалов А.В. *Екатеринбург*

Макаров А.В. *Екатеринбург*

Митюшов Е.А. *Екатеринбург*

Москвичев В.В. *Красноярск*

Наймарк О.Б. *Пермь*

Панин С.В. *Томск*

Плехов О.А. *Пермь*

Пугачева Н.Б. *Екатеринбург*

Радченко В.П. *Самара*

Ринкевич А.Б. *Екатеринбург*

Трусов П.В. *Пермь*

Худорожкова Ю.В. *Екатеринбург*

Швейкин В.П. *Екатеринбург*

ХII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» Екатеринбург, 21–25 мая 2018 г. : сб. материалов. – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2018. – 494 с. – ISBN 978-5-6040873-0-5.

В сборнике представлены материалы международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» которая продолжают традиции конференций «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» и «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», проводимых с 2001 года.

Сборник предназначен для специалистов различных научных специальностей: механиков, физиков, материаловедов и т. д., а также представителей промышленности, что объясняется междисциплинарным характером опубликованных докладов.

Ответственность за содержание и оформление предоставленных материалов несут авторы.

Организаторы конференции:

ФАНО России, УрО РАН, ИМАШ УрО РАН, ИФПМ СО РАН, при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08-20020 г).

ISBN 978-5-6040873-0-5



9 785604 087305

© ИМАШ УрО РАН, 2018

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА В УСЛОВИЯХ МНОГОФАКТОРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ТИПА КОФФИНА

Авруцкий В.В.¹, Зинин А.В.², Бычков Н.Г.³, Андросович И.В.⁴

^{1,3}ФГУП ГНЦ «Центральный институт авиационного моторостроения
имени П.И. Баранова» (ЦИАМ), г. Москва, Российская Федерация,

^{2,4}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ,
г. Москва, Российская Федерация, e-mail: lutavr@yandex.ru, zininav@mai.ru

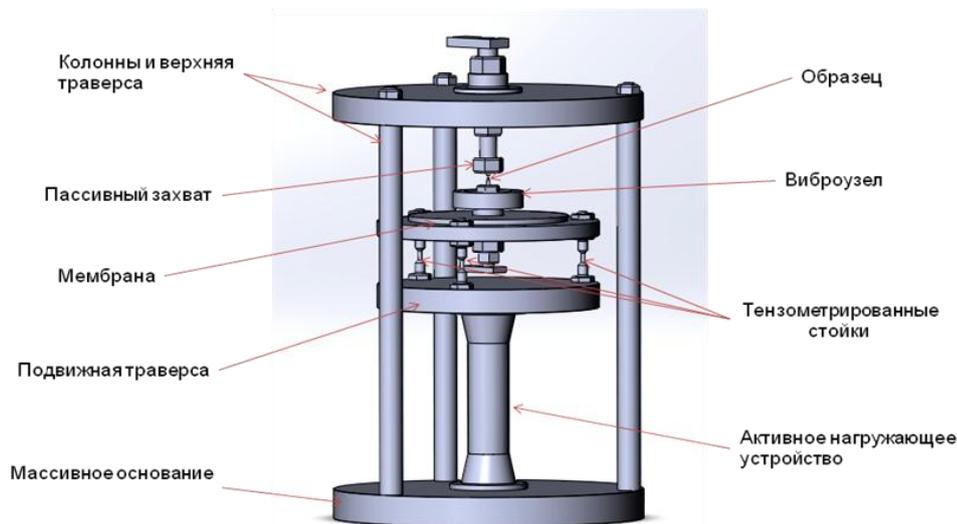
Приведена методика экспериментальной оценки неизотермической малоцикловой усталости, представлена испытательная машина для исследования термоциклической долговечности жаропрочного сплава ЖС6У при действии вибрационных нагрузок. Описана технология определения вибрационной составляющей при двухчастотном нагружении. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, двухчастотное неизотермическое нагружение, вибрационные нагрузки, жаропрочный сплав.

Одними из наиболее напряженных, ответственных и во многом определяющих прочностную надежность и ресурс двигателя в целом элементов конструкции являются лопатки турбин ГТД, работающие в экстремальных условиях, при которых статические, циклические и динамические напряжения реализуются совместно в неизотермических условиях при наличии экстремальных температур в цикле нагружения. Все это приводит к появлению в материале обширных областей, охваченных циклическими пластическими деформациями, в которых исходные деформационные и прочностные свойства материала претерпевают значимые изменения [1].

Циклическость нагружения деталей двигателя обусловлена условиями эксплуатации. Каждый выход на взлетный режим приводит к существенному увеличению неравномерности температурного поля во многих деталях, в том числе таких нагруженных, как лопатки и диски турбины. Статистический анализ показал, что при доводке и эксплуатации авиационных ГТД дефекты от термоциклирования составляют примерно 20 % прочностных дефектов. Поэтому изучение циклических воздействий механических нагрузок и неравномерных нагревов становится насущной задачей. Актуальность проблемы термоциклирования с течением времени будет возрастать, так как развитие современных АГТД идет в направлении повышения температуры перед турбиной и увеличения степени сжатия [2]. Однако детали горячей части авиационных газотурбинных двигателей работают в условиях сложного нагружения, включающего не только нагрузки высокого уровня, например термические нагрузки, обусловленные неравномерностью температурных полей, силовые нагрузки от действия центробежных сил для деталей ротора и давления для корпусных деталей и вибрационные низкоуровневых нагрузок от неравномерности газового потока, дисбаланса элементов ротора, агрегатов и др. Высокоуровневые нагрузки, связанные с циклом работы двигателя, носят циклический характер, низкоуровневые изменяются достаточно слабо.

Значительная часть характеристик термической усталости материалов получена в мировой практике «коффиновским» методом: испытываемый образец защемляется между двумя жесткими мембранами и разогревается. При разогреве происходит его термическое расширение, приводящее к возникновению сжимающих напряжений и пластической деформации материала. При охлаждении в образце возникают растягивающие напряжения. Такой метод хорошо имитирует работу материала лопаток турбины. В ЦИАМ изготовлены испытательные машины такого типа [3]. Для испытания в условиях комбинированного нагружения (термоциклическое с наложенными вибрационными нагрузками) разработана машина П-926 (рисунок), обеспечивающая термомеханическое нагружение образца «коффиновским» методом и высокочастотные осевые нагрузки, имитирующие эксплуатационные уровни вибрации деталей двигателей ГТД [6].



Испытательная машина П-926

Испытательная машина П-926 использует метод нагрева с помощью прямого пропускания тока через образец и имеет массивное основание, на котором установлена силовая рама, состоящая из колонн, связанных между собой при помощи верхней траверсы. На основании размещено активное нагружающее устройство для создания осевой нагрузки. На верхней траверсе закреплена втулка, в которой установлен пассивный захват, имеющий возможность осевого перемещения для регулирования положения образца в процессе подготовки испытаний. На подвижной траверсе размещена платформа с мембраной, которая связана с нижней траверсой при помощи трех тензометрированных стержней. На платформе закреплён корпус виброузла для нагружения образца высокочастотной знакопеременной нагрузкой. Виброузел содержит диск, центральная часть которого представляет собой активный захват, расположенный соосно пассивному захвату, периферийная часть диска содержит равномерно распределённую по его окружности инерционную массу, а средняя часть – жестко связана с корпусом устройства. Также установлен пакет пьезоэлементов. На активном захвате закреплён датчик для контроля величины перемещений.

На этапе отработки методики были проведены испытания серии стандартных образцов из литого никелевого сплава на термоциклическую долговечность в условиях многофакторного нагружения. Испытания проводились при комбинированном нагружении для трех значений размаха напряжений в цикле: $\Delta\sigma_1 = 84 \text{ кг/мм}^2$, $\Delta\sigma_2 = 96 \text{ кг/мм}^2$, $\Delta\sigma_3 = 106 \text{ кг/мм}^2$, и трех уровней вибронгрузки: $\Delta\sigma_{в1} = 0 \text{ кг/мм}^2$, $\Delta\sigma_{в2} = 2 \text{ кг/мм}^2$, $\Delta\sigma_{в3} = 4 \text{ кг/мм}^2$. На каждом режиме испытывалось три образца.

Литература

1. Колотников М. Е. Предельные состояния деталей и прогнозирование ресурса газотурбинных двигателей в условиях многокомпонентного нагружения / под науч. ред. В. М. Чепкина. – Рыбинск : РГАТА, 2003. – 134
2. Кузнецов Н. Д. Проблемы термоциклической прочности деталей ГТД // Проблемы прочности. – 1978. – № 6.
3. Техническая справка ЦИАМ. Установка для испытаний образцов из жаропрочных сплавов при совместном действии термомеханического нагружения и вибрации.
4. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. – СПб. : СВЕН, 2014. – 312 с. – (Методы и средства неразрушающего контроля). – ISBN 978-5-91161-014-2.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

Агапитова О.Ю., Бывальцев С.В., Залазинский А.Г.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: agapitova.olesya@yandex.ru, s_ikar@mail.ru, zal@imach.uran.ru*

Для повышения срока службы инструмента, обеспечения технологичности изготовления изделий необходимо правильно выбрать конструкцию и материал инструмента.

Известен способ уменьшения напряжений и, как следствие, повышения прочности толстостенных цилиндров путем замены сплошного цилиндра составным. При этом наружная часть контейнера устанавливается с натягом на внутреннюю часть контейнера (втулку). В результате натяга в двухслойном составном контейнере возникают начальные напряжения, причем, чем больше величина натяга, тем больше начальные напряжения.

Цель исследования – анализ напряженно-деформированного состояния инструмента при гидромеханическом выдавливании.

В настоящей работе определены напряжения, возникающие на стенках составного контейнера, реализующего процесс гидромеханического выдавливания.

Был проведен предварительный аналитический расчет и проверочный расчет на прочность составного контейнера с использованием метода конечных элементов.

На первом этапе определяли напряжения, возникающие на стенках однослойного контейнера с внутренним радиусом 15 мм и наружным радиусом 50 мм.

Расчет напряжения однослойного контейнера показал, что реализация гидромеханического выдавливания в таком контейнере возможна только при использовании высокопрочных материалов для изготовления инструмента.

На втором этапе провели расчет составного контейнера с такими же размерами инструмента, но состоящего из двух частей: контейнер был собран с предварительным натягом, наружный радиус втулки 30 мм. При этом учитывали, что полные напряжения в контейнере являются суммой начальных и дополнительных напряжений, возникающих от действия внешних сил.

Начальное давление, возникающее при горячей посадке, рассчитывали по формуле:

$$P_{ГП} = \frac{\Delta E (R_b^2 - R_a^2) (R_c^2 - R_b^2)}{2b^3 (R_c^2 - R_a^2)}.$$

Для определения напряжений на поверхностях цилиндра использовали формулу Ламе. Заменяв действие одного цилиндра на другой некоторым давлением $p_{ГП}$, получили распределения начальных напряжений $\sigma_0^{оп}$ на внутренней поверхности втулки, на диаметре сопряжения и на наружном диаметре контейнера. Также рассчитали напряжения $\sigma^{оп}$, возникающие от внутреннего давления.

Полные напряжения $\sigma_p^{оп} = \sigma_0^{оп} + \sigma^{оп}$ определяли на внутреннем диаметре втулки, на наружном диаметре втулки, на внутреннем диаметре контейнера и на наружном диаметре контейнера. Были построены эпюры напряжений.

Согласно теории прочности рассчитали эквивалентное напряжение:

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2} \leq [\sigma].$$

Проведенный расчет коэффициента запаса прочности для составного контейнера позволяет оценить прочность конструкции и изготавливать инструмент даже из легированной конструкционной стали марки 40Х.

На третьем этапе учитывали все конструктивные особенности составного контейнера, например наличие буртика. При этом методом конечных элементов провели прочностной расчет составного контейнера. В результате моделирования было получено распределение напряжений на стенках контейнера.

Максимальное значение интенсивности напряжений возникает на внутреннем диаметре контейнера, минимальные значения интенсивности напряжений локализуются на наружном диаметре втулки.

Из анализа напряженно-деформированного состояния инструмента при гидромеханическом выдавливании сделаны следующие выводы:

1) максимальные растягивающие напряжения однослойного контейнера возникают по внутреннему диаметру и могут составлять значительную величину, требующую использования высокопрочных материалов;

2) двухслойный составной контейнер с такими же размерами, изготовленный с предварительным натягом, значительно снижает растягивающие напряжения в инструменте, но дополнительно возникают сжимающие напряжения по внешнему диаметру втулки. При этом возможно изготовление составного контейнера из менее прочных материалов;

3) сравнение аналитических расчетов с результатами моделирования методом конечных элементов показывает, что учет наличия незначительных конструктивных особенностей не оказывает существенного влияния на точность расчетов и для выбора материала достаточно предварительного аналитического расчета.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ И ОПИСАНИЕ ВЯЗКОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Адамов А.А.

*ИМСС УрО РАН, д. 1, ул. Ак. Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: adamov@icmm.ru*

Цель работы – обоснование выбора серийно выпускаемого антифрикционного полимерного материала (АПМ) для современных тяжело нагруженных узлов трения на основе экспериментального изучения механических свойств АПМ и моделирование его трехмерного механического поведения в соответствующем рабочем диапазоне деформаций, напряжений.

В рассматриваемых узлах трения к АПМ предъявляются высокие требования по долговечности, жесткости, ползучести, характеристикам трения и износостойкости. Важным обстоятельством для производителей изделий является доступность используемых АПМ, поэтому не рассматривается применение ранее испытанных перспективных материалов типа радиационно-модифицированного фторопласта, сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) с опытных производств в Томске и Казани.

Традиционно тонкие слои АПМ помещаются в углубления металлических элементов узлов трения. Напряженно-деформированное состояние (НДС) тонких слоев АПМ близко к состоянию стесненного сжатия, что позволяет АПМ длительно работать при контактных давлениях более 60 МПа.

Проблемными для практики являются периферийные зоны со свободно выступающей из углубления частью слоя АПМ, необходимой для обеспечения работоспособности узла трения с учетом деформации сжатия от рабочей нагрузки и износостойкости. В этой области АПМ имеет на краю сложное НДС, переходящее с приближением к краю от состояния стесненного сжатия к свободному сжатию.

В состоянии стесненного сжатия образцы испытанных композитов на основе СВМПЭ (российского производства, но из импортного сырья) при циклических многоступенчатых нагружениях до 160 МПа демонстрируют почти упругое нелинейное поведение со слабым упрочнением и малыми остаточными деформациями.

Аналогичное циклическое нагружение с участками релаксации и восстановления после разгрузки при деформациях до 10 % в состоянии свободного сжатия дает диаграммы сжатия с разупрочнением, показывает вязкоупругопластическое поведение при напряжениях до 40 МПа со значительными проявлениями релаксации напряжений и значительными остаточными деформациями после разгрузки.

При относительном циклическом сдвиговом смещении элементов контактной пары на слой АПМ дополнительно действует поле напряжений сдвига, накладываемое на состояние свободного сжатия, что приводит к необратимому выползанию материала на свободном краю слоя за счет необратимых девиаторных составляющих тензора деформаций.

Реализована программа и методика экспериментального исследования для двух композитов на основе СВМПЭ, позволяющая разделить общую деформацию образцов при свободном сжатии на обратимые и необратимые составляющие различной природы.

По результатам экспериментальных работ построена и идентифицирована модель изотропного вязкоупругопластического поведения в рамках теории малых деформаций с учетом упругой объемной сжимаемости, упругих, обратимых и необратимых со временем выдержки в разгруженном состоянии девиаторных составляющих тензора деформаций.

Идентифицированная модель достаточна для численного анализа и оценки работоспособности тяжело нагруженных узлов трения, содержащих тонкие слои АПМ, при нестационарных режимах нагружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-08-00903.

МЕТОД РИТМОКАРДИОГРАФИИ В ОЦЕНКЕ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА В ВЕГЕТАТИВНЫХ НАГРУЗОЧНЫХ ПРОБАХ У МУЖЧИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИСХОДНОГО ВЕГЕТАТИВНОГО ТОНУСА

Акимова А.В., Миронов В.А.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» МЗ РФ
Репина, 3, Екатеринбург, 620028, Российская Федерация,
e-mail: anna_v_akimova@mail.ru

Цель исследования – изучить адаптационные возможности молодых людей с преимущественной симпатической, парасимпатической направленностью вегетативных реакций в сравнении с пациентами с хронической оториноларингологической и патологией верхних дыхательных путей в стадии ремиссии и клиническими проявлениями вегетативных дисрегуляций.

Материалы и методы

В исследовании участвовали 143 военнослужащих срочной службы (3 группы). В первой группе – 38 мужчин с клиническими проявлениями, характерными для симпатикотонии, во второй – 68 человек с преимущественно парасимпатическими влияниями, в третьей – лица с хроническими оториноларингологическими заболеваниями и заболеваниями верхних дыхательных путей вне обострения с клиническими проявлениями синдрома вегетативной дисфункции ($n = 37$).

Проводили осмотр терапевта и оториноларинголога, с целью выявления симптомов вегетативной дисфункции при помощи Опросника Вейна и оценки критериев исходного вегетативного тонуса (А.М. Вейн, 1981, 1998). Оценивали состояние вегетативной регуляции с применением анализа вариабельности сердечного ритма методом ритмокардиографии высокого разрешения в покое и разнонаправленных вегетативных нагрузочных пробах.

Результаты

Группы не различались по возрасту ($21,52 \pm 2,68$; $22,29 \pm 3,50$; $21,60 \pm 2,20$, $p > 0,05$) и полу. Межсистолические интервалы отличались исходно в покое с наибольшими значениями в группе 2 и наименьшими в группе 1. Наибольший прирост длительности RR зарегистрирован в позднем постстимульном периоде в группе 2 на 3,5 %, вследствие дальнейшего повышения вагусного влияния на регуляцию сердечного ритма при физической нагрузке.

Вариабельность сердечного ритма (σ_{RR}) в группе 2 сохраняла низкую изменчивость показателя и наибольшую стабильность гомеостаза, несмотря на разнонаправленные стимуляционные воздействия, по сравнению с группами 1 и 3, в которых этот показатель значительно повысился после выполнения нагрузочной пробы, $p < 0,05$.

В активном ортостазе наибольшая разница по сравнению с фоном зарегистрирована в группе 2.

В позднем постстимульном периоде нагрузочной пробы, отмечен заметный прирост значения SDNN в группе 1 и 3, снижение показателя в группе 2. Выявлено увеличение симпатического влияния в группе 1 в активном ортостазе, в покое, при симпатической стимуляции и после нагрузки. В группе 3 в постстимульном периоде нагрузочной пробы отмечено повышение показателя σ_s %, при отсутствии значимых изменений в группе 2.

При выполнении нагрузочных проб выявлено удлинение времени достижения требуемой ЧСС в группе 2 с наибольшим временем восстановления до исходного уровня в группе.

Выводы

1. Наибольшей толерантностью к вегетативным нагрузочным пробам отличается группа 2 с повышением вагусного влияния на сердечный ритм в виде достаточного парасимпатического обеспечения без подключения симпатического и гуморально-метаболического.

2. Группе лиц с повышением симпатического влияния на ритм для выполнения ортостатической пробы необходимо подключение большего количества симпатического влияния, чем другим группам. При выполнении нагрузочной пробы, дозированной по ЧСС 120, отмечена также повышенная симпатическая реакция, отражающая гиперсимпатикотонический тип реакции на нагрузку.

3. Пациенты с хронической оториноларингологической патологией и заболеваниями верхних дыхательных путей, имея более высокую вариабельность, чем лица с симпатикотонией, при выполнении нагрузочной пробы в большей мере подключают парасимпатическое влияние на ритм, чем симпатикотоники.

4. Все группы обследуемых одинаково реагируют на разнонаправленные нагрузочные тесты. Отличия заключались в разнице включения адаптационных механизмов: симпатических – у лиц с симпатической направленностью реакций, парасимпатических – у лиц с хроническими заболеваниями ЛОР-органов и верхних дыхательных путей с вегетативной дисфункцией.

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОЙ МАТРИЦЕ (СВМПЭ)

Панин С.В.^{1,2}, Корниенко Л.А.¹, Валентюкевич Н.Н.², Алексенко В.О.^{1,2}, Иванова Л.Р.¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, Академический пр., г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: svp@ispms.tsc.ru

²Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,
30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация

Антифрикционные полимерные композиционные материалы широко применяются в составе узлов трения и в качестве уплотнительных элементов в различных видах современной техники и медицине, определяя их надежность и долговечность. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) занимает особое место среди полимерных смол благодаря хорошим деформационно-прочностным показателям, низкому коэффициенту трения и высокой износостойкости, химической стойкости к агрессивным средам, широкому температурному интервалу формостабильности. Этот комплекс свойств позволяет применять СВМПЭ в изделиях, обладающих стойкостью к удару, растрескиванию и истиранию. Выбором наполнителей можно целенаправленно изменять функциональные свойства и расширять область использования СВМПЭ в машиностроении, химических технологиях, сельском хозяйстве и других областях техники. При разработке композиционных материалов на основе СВМПЭ, как правило, ориентируются на преимущественные условия их эксплуатации: сухое трение, трение в режиме граничной смазки, абразивный износ. Поэтому разработка трехкомпонентных композитов на СВМПЭ-матрице позволяет одновременно повысить прочностные свойства композитов и износостойкость за счет введения в композицию твердосмазочных наполнителей. В частности, углеродные микроволокна позволяют обеспечить повышение модуля упругости, предела текучести и предела прочности, а мелкодисперсный политетрафторэтилен обеспечит твердую смазку композита.

В настоящей работе исследованы механические и триботехнические характеристики двух- и трехкомпонентных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного короткими микро-углеродными волокнами и мелкодисперсным политетрафторэтиленом в условиях различных нагрузок и скоростей скольжения (60 Н×0,3 м/с, 60 Н×0,5 м/с, 140 Н×0,3 м/с, 140 Н×0,5 м/с). Использован порошок СВМПЭ фирмы Ticona (GUR-2122) молекулярной массой 4,0 млн и размером частиц 5×15 мкм, порошок ПТФЭ марки «Флуралит» размером <3 мкм, короткие углеродные микроволокна средней длиной ~65 мкм (ш 7,5 мкм).

Механические характеристики определяли при разрывных испытаниях на электромеханической испытательной машине Instron 5582 при растяжении образцов в форме двойной лопатки при количестве образцов одного типа не менее 4 (ГОСТ 11262-80). Испытания на износостойкость проводили на машине трения 2071 СМТ-1 по схеме «вал-колодка». Для исследования поверхностей испытанных образцов использовали оптический профилометр New View 6200 (Zygo). Структура композитов исследована с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (Carl Zeiss) при ускоряющем напряжении 20 кВ на поверхностях скола образцов с надрезом, механически разрушенных после выдержки в жидком азоте.

Показано, что при умеренных скорости и нагрузке ($P = 60 \text{ Н} \times V = 0,3 \text{ м/с}$) оптимальный состав композита: СВМПЭ+5 вес. % флуралита+5 вес. % углеволокна (износостойкость повышается вдвое). В жестких условиях испытаний ($P = 140 \text{ Н} \times V = 0,5 \text{ м/с}$) двукратное увеличение износостойкости показывает композит СВМПЭ + 5 вес. % флуралита + 10 вес. % углеволокна. Обсуждаются механизмы изнашивания трехкомпонентных композитов на основе СВМПЭ.

Работа выполнена в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» Министерства образования и науки РФ; Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154.

СТРУКТУРА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВОССТАНОВЛЕННОЙ СТАЛИ ШХ15, СПЕЧЕННЫХ НА ВОЗДУХЕ, И ИХ ИЗНОС ПРИ ТРЕНИИ С ТОКОСЪЕМОМ ПО МЕДИ

Алеутдинова М.И., Фадин В.В.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: aleut@ispms.ru*

Токосъемные материалы характеризуются интенсивностью изнашивания, а также стоимостью изготовления. Низкая интенсивность изнашивания реализуется, когда поверхностный слой имеет высокую прочность и релаксация напряжений в пятнах контакта происходит за счет упругой деформации. Это возможно при правильном задании первичной структуры материала, введении смазки в контактное пространство и т. п. Контактная плотность тока j является основным разрушающим фактором поверхностного слоя. Обычно токосъемные щетки применяются при $j < 60 \text{ А/см}^2$ без смазки. Увеличение j возможно в присутствии граничной смазки. Представляет интерес создать недорогой материал, способный проявить низкую интенсивность изнашивания при скольжении с $j > 100 \text{ А/см}^2$ в смазке. Можно предположить, что порошковая сталь ШХ15, переработанная из шлифовального шлама производства шариковых подшипников, может служить основой спеченного износостойкого материала для скольжения с $j > 100 \text{ А/см}^2$ в смазке. Спекание на воздухе также может представлять интерес вследствие простоты и низкой стоимости этой технологии изготовления.

Цель настоящей работы – оценить способность спеченных композитов на основе переработанной стали ШХ15 проявить высокую износостойкость при граничном трении по медному контртелу под воздействием электрического тока с контактной плотностью более 100 А/см^2 .

Порошковые смеси составов сталь–медь, сталь–графит и сталь–медь–графит были прессованы при давлении 550 МПа, погружены в порошки керамики Al_2O_3 и графита и спечены в электрической печи при температуре 960 °С в течение 3 ч. Металлографическое изучение сечения поверхностного слоя и структуры материала проведено на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 1С. Свойства (твердость HV по Бринеллю, предел прочности при изгибе σ , удельное электросопротивление ρ , пористость P) спеченных композитов определены по стандартным методикам. Скользящий токосъем осуществлен по стандартной схеме сопряжения «pin-on-ring» при переменном токе, контактном давлении $p = 0,09 \text{ МПа}$, скорости скольжения $v = 5 \text{ м/с}$ по медному контртелу на машине трения СМТ-1.

Каркас композитов состава сталь–(8–22) % графита характеризовался высоким уровнем перколяции пор. Это способствовало хорошему наполнению порового пространства маслом. Низкие значения HV , σ и высокое ρ композитов обусловлены слабым взаимодействием между частицами стального каркаса. Однако износ был около нуля за счет скольжения с самосмазыванием. Катастрофическое изнашивание возникало в результате повышения температуры поверхностного слоя, испарения масла и возникновения адгезии при сухом трении. Это привело к появлению трещин в контактах между частицами стального каркаса и быстрому образованию фрагментов разрушения ПС.

Композит состава сталь–15 % Cu имел высокий уровень перколяции пор, удовлетворительные механические и электрические свойства, хорошо пропитывался маслом и проявил квазиулевым износ в течение 1 ч при $j > 200 \text{ А/см}^2$ за счет хорошего самосмазывания. Увеличение концентрации меди приводило к повышению концентрации изолированных пор, что затрудняло проникновение масла в композит. Результатом было неудовлетворительное самосмазывание и ненадежный электрический контакт.

Предполагалось, что композиты состава сталь–(8–16) % графит–(30–45) % Cu способны обеспечить удовлетворительное самосмазывание. Однако их структура имела высокую концентрацию изолированных пор и скользящий электроконтакт был неустойчивым. Отсюда

следует, что прочность ПС самосмазвающегося материала зависит от структуры порового пространства сильнее, чем от состава материала. Поэтому конструкция такого материала должна иметь прежде всего высокую пористость и высокую перколяцию пор для достижения высокой износостойкости под воздействием электрического тока экстремальной плотности.

В заключение можно отметить, что переработанная сталь ШХ15 может служить основой токоъемных материалов, способных осуществить износостойкий скользящий электроконтакт с плотностью тока более 200 A/cm^2 в режиме самосмазывания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-48-700434).

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ КОНТАКТНОГО СЛОЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ ПО СТАЛИ 45

Фадин В.В., Алеутдинова М.И., Почивалов Ю.И.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: aleut@ispms.ru*

Напряжения в поверхностном слое металлов, возникающие при скольжении с плотностью электрического тока более 100 А/см^2 , релаксируются за счет пластической деформации и за счет образования трибослоя. Толщина образующегося слоя показывает ориентировочную глубину проникновения пластической деформации и зависит от параметров первичной структуры (химического состава). Быстрая релаксация напряжений вследствие легкости пластической деформации приводит к образованию тонкого трибослоя. В этом случае скользящий контакт характеризуется высокой электропроводностью и износостойкостью. Можно предположить, что эта закономерность будет выполняться при скольжении нелегированных металлов, имеющих простой состав, например медь и никель. Пластичность, теплопроводность и электропроводность цветных металлов с ГЦК-решеткой, как правило, выше этих же характеристик черных металлов. Характеристики контакта и параметры трибослоя пластичных металлов представляется целесообразным качественно сравнить с такими же параметрами менее пластичных цветных металлов (например титана и никелида титана).

Цель настоящей работы – изучение взаимосвязи характеристик контакта и параметров трибослоя цветных металлов под воздействием электрического тока контактной плотностью более 100 А/см^2 при сухом скольжении.

Модельными материалами служили медь, никель, титан и никелид титана. Скользящий токосъем осуществлен без смазки по стандартной схеме сопряжения «pin-on-ring» при переменном токе, контактном давлении $p = 0,13 \text{ МПа}$, скорости скольжения $v = 5 \text{ м/с}$ на машине трения СМТ-1. Контртелом служила сталь 45 (50 HRC).

Характер контактного взаимодействия проявляется в поведении токовой зависимости электропроводности и износостойкости. Удельная поверхностная электропроводность $r_s^{-1} = j/U$ контакта металлов увеличивается до некоторого значения контактной плотности тока j и контактного падения напряжения U . Максимальная электропроводность r_s^{-1} контакта металлов соответствует точке перегиба на кривой $r_s^{-1}(j)$ и соответствует резкому увеличению интенсивности изнашивания I_h . Электропроводность контактов меди и никеля примерно одинаковы, но никель имеет более высокую интенсивность изнашивания при любой плотности тока. Катастрофическое изнашивание никеля начинается при трении с более низкой контактной плотностью тока j . Титан формирует контакт с относительно низкими электропроводностью и износостойкостью, по сравнению с медью, но катастрофическое изнашивание начинается при более высокой j . Никелид титана проявляет низкую электропроводность и высокую интенсивность изнашивания прежде всего различием структурных состояний поверхностного слоя и его пластичностью. Пластическая деформация поверхностного слоя всех представленных металлов приводит к образованию структуры трибослоя, отличной от первичной структуры. Толщина трибослоя меди, никеля и титана меньше 20 мкм , что может указывать на низкий масштаб деформации. Трибослой NiTi имеет большую толщину, неравномерно распределен по поверхности образца, непрочно связан с основой и имеет следы хрупкого разрушения. Трибослой никеля и меди образуется в результате внедрения частиц, образующихся в процессе трения в пластичную основу. Поверхность скольжения этих металлов имеет следы оттеснения неровностями контртела и признаки возникновения вязкой жидкости. Релаксация напряжений по механизму вязкой жидкости реализуется только под воздействием тока. Сухое трение без тока вызывает адгезионное взаимодействие меди со

сталью и никеля со сталью без признаков образования жидкой фазы в явном виде. На поверхности скольжения титана после трения с током жидкая фаза проявлена в малом количестве, но наблюдаются хрупкие трещины.

Нагружение цветных нелегированных металлов сухим трением скольжения с высокой контактной плотностью тока приводит к образованию трибослоя различной толщины. Материалы показывают высокие характеристики контакта, если напряжения релаксируются по механизму вязкой жидкости. Усложнение состава и уменьшение пластичности материала (Ni, NiTi) затрудняет релаксацию напряжений по такому механизму и способствует более интенсивному разрушению поверхности.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы, направление III.23.

ОБ ОБРАЗОВАНИИ СТРУКТУРНО-ИЗМЕНЕННЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В УСЛОВИЯХ СКОЛЬЖЕНИЯ

Фадин В.В., Алеутдинова М.И.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: aleut@ispms.ru*

Динамическое воздействие на материал в пятнах контакта металлических материалов под воздействием электрического тока при сухом трении вызывает локальные напряжения в деформируемом объеме, которые должны быть релаксированы пластическими микросдвигами. Тогда может образоваться трибослой с новыми структурными состояниями. Свойства этого трибослоя задают износостойкость и электропроводность контакта и зависят, отчасти, от параметров первичной структуры. Стали с низкой пластичностью слабо релаксируют напряжения, поэтому пластическая деформация распространяется на большую глубину и трибослой имеет большую толщину. Поиск закономерностей поведения трибосистемы с током при изменении ее входных параметров является необходимым этапом при создании новых износостойких материалов.

Цель настоящей работы – получение начальных представлений о взаимосвязи первичной структуры материалов и характеристик их скользящего сухого контакта под воздействием электрического тока плотностью выше 100 А/см^2 .

Сталь 3, композиты $\text{Cu} - 10 \% \text{ Гр} - 70 \% \text{ Г13}$ и $\text{Cu} - 10 \% \text{ Гр} - 70 \% \text{ ШХ15}$ (где Гр – графит, Г13 – сталь Гадфильда (13 % Mn) и ШХ15 – подшипниковая сталь (1,5 % Cr и 0,6 % C), восстановленная из шлифовальных шламов) применены в качестве модельных материалов. Композиты были спечены в вакууме при температуре $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч. Скользящий током осуществлен без смазки по стандартной схеме сопряжения «pin-on-ting» при переменном токе, контактном давлении $p = 0,13 \text{ МПа}$, скорости скольжения $v = 5 \text{ м/с}$ на машине трения СМТ-1. Контртелом служила сталь 45 (50 HRC).

Композит на основе стали Г13 должен осуществлять контакт на частицах стали Гадфильда. Высокая твердость этих частиц ($HV \approx 2,4-2,6 \text{ ГПа}$), высокая концентрация легирующего элемента не позволяют проявить высокую пластичность, поэтому пластическая деформация поверхностного слоя проникает на большую глубину. Это проявляется как относительно большая толщина трибослоя, ее сильная зависимость от контактной плотности тока j , низкая электропроводность контакта и высокая интенсивность изнашивания I_h . Низкая концентрация легирующих элементов в композите на основе подшипниковой стали ШХ15 не препятствует релаксации напряжений в пятнах контакта, пластическая деформация происходит в слоях материала на небольшой глубине, толщина трибослоя невысока и слабо зависит от тока. Сталь 1020 образует наиболее тонкий трибослой, толщина которого относительно слабо увеличивается при увеличении j . Это обусловлено отсутствием направленного легирования стали 1020 и ее вполне высокой пластичностью.

Наиболее концентрированные потоки энергии проходят через материал пятен контакта, которые целесообразно оценить. было допущено, что все процессы при трении сосредоточены в трибослое образца, твердость трибослоя и электросопротивление между трибослоем и контртелом не изменяются при увеличении тока, а также 90 % мощности трения рассеивается как теплота. тогда минимальная удельная поверхностная мощность q_r , необходимая для активации фазового превращения в окрестности пятен контакта имеет значения в пределах 1 МВ/см^2 независимо от состава материала и удельная мощность q_{rc} на пятнах контакта, приводящая к катастрофическому изнашиванию, может достигать значений $1,5-2 \text{ МВ/см}^2$. твердость трибослоя превышает твердость исходного материала приблизительно в 3 раза независимо от состава материала и его физических или механических характеристик. непластичный трибослой разрушается при относительно низких значениях тока и

низкой удельной мощности. мощность тока на пятнах контакта превышает мощность механического взаимодействия поверхностей не более чем в 2,5–3 раза.

В заключение можно отметить, что низкая пластичность первичной структуры, обусловленная различными видами упрочнения (легированием, присутствием высокомолекулярных фаз и т. п.), не позволяет осуществлять удовлетворительную релаксацию напряжений в пятнах контакта и вызывает образование трибослоя с большой толщиной, который легко разрушается и реализуется высокая интенсивность изнашивания, высокое электрическое сопротивление на пятнах контакта и низкая электрическая проводимость контакта.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы, направление Ш.23.

СВАРИВАЕМОСТЬ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Корнилова З.Г., Аммосов А.П., Аммосов Г.С.

*ИФТПС СО РАН, 1, ул. Октябрьская, г. Якутск,
677891 Республика Саха (Якутия), Российская Федерация,
e-mail: ammosov.g@mail.ru*

Линейно-производственное управление магистральных газопроводов (ЛПУМГ) – одно из старейших подразделений ОАО «Сахатранснефтегаз» – действительное рождение получило в 1962 г. как «Якутская дирекция строящихся газопроводов». В то время только начиналось обустройство Усть-Вилуйского газового промысла и эпопея прокладки в зоне вечной мерзлоты газопровода «Таас Тумус–Якутск». Эта тяжелейшая работа положила начало осуществлению газификации Центрального района Республики Саха (Якутия). ЛПУМГ осуществляет эксплуатацию 1942,94 км магистральных газопроводов и газопроводотводов, 30 ГРС и АГРС, транспортировку газа в объеме 1,63 млрд м³ в год (на 01.01.2014 г.). В работе рассматриваются особенности разрушений магистральных газопроводов (МГ) по сварным соединениям и их связь с технологией монтажной сварки неповоротных стыков труб до –35°...–50 °С в полевых условиях. В 2003 г., с интервалом в две недели произошли две аварии МГ, эксплуатирующегося более 30 лет. Первая авария газопровода Берге–Якутск представляла собой раскрытие металла вдоль трубопровода в верхней части с многочисленными ветвлениями трещины на месте монтажного кольцевого шва, общей протяженностью разрушения 2,16 м. Вторая авария – разрыв кольцевого сварного шва с последующим выбросом труб от оси укладки с радиусом 30–50 м, общая длина разрушения – 22 м. Очагом второго разрушения послужила сквозная трещина – свищ на нижней части трубопровода на месте кольцевого сварного шва и заводского продольного шва.

Сварка неповоротных стыков труб производится в трех пространственных положениях: нижняя, вертикально вверх или вниз, потолочная сварка. В работе рассмотрены режимы сварки стыков труб МГ «Мастах–Берге–Якутск» в полевых условиях, оценена свариваемость трубных сталей 09Г2С и 17Г1С. Для этого определяются их основные характеристики по лабораторным испытаниям и справочным данным существующих ГОСТов. Показано, что металл зоны термического влияния (ЗТВ) при сварке с приведенными значениями $q_{п}$ – погонная энергия, кДж/м, стыков труб газопровода в условиях низких климатических температур значительно разупрочняется, возникает склонность к образованию в сварных соединениях стыков труб эксплуатационных дефектов и трещин в металле ЗТВ. По статистическим данным отказов более 50 % приходится на сварные кольцевые швы с образованием сквозной трещины – свища. При изучении причин образования свищей выявлено, что основные очаги разрушений – дефекты сварки корневого шва (непровары, поры, шлаки и др.), являющиеся концентраторами напряжений. Следовательно, возникновение многочисленных дефектов в зонах сварных соединений МГ связано с некоторыми недоработками технологии монтажной сварки стыков труб в условиях низких климатических температур до –50 °С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ В РАСТРУБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Аммосова О.А., Старостин Н.П.

*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН,
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Российская Федерация,
e-mail: ammosova_o@mail.ru, nikstar56@mail.ru*

При строительстве и реконструкции газопроводов из полиэтиленовых труб применяются два способа сварки: нагретым инструментом встык и при помощи соединительных деталей с закладными нагревателями. Сварка в раструб широко распространена для сварки полипропиленовых труб, используемых при монтаже систем горячего и холодного водоснабжения. Считается, что такой способ сварки эффективен при монтаже систем с большим количеством поворотов. Сварка полиэтиленовых труб в раструб не получила такого широкого распространения несмотря на то, что является таким же технически простым в реализации и надежным, как и применительно к полипропиленовым трубам. Такое положение связано не только с тем, что полиэтиленовые трубы используются в основном для прокладки наружных трубопроводов с большой протяженностью линий и малым числом поворотов, но и ввиду сложившихся обстоятельств по разработке нормативных документов. В настоящее время полиэтиленовые трубы широко применяются в регионах холодного климата для монтажа систем водоснабжения, прокладываемых подземным способом. Преимущество полиэтиленовых труб в таких системах заключается в том, что полиэтилен не теряет свои свойства при низких температурах. При замерзании воды внутри в полиэтиленовой трубе не распространяется трещина, как это свойственно полипропиленовым трубам. С совершенствованием технологий производства полиэтиленовых труб, с уменьшением их овальностей применение сварки в раструб в строительстве трубопроводных систем будет расширяться, включая строительство газопроводов.

В работе на основе математического моделирования теплового процесса предлагается методика определения технологических параметров сварки полиэтиленовых труб в раструб при низких температурах из условия обеспечения протекания теплового процесса по закономерностям, соответствующим изменению температуры при сварке в условиях допустимых для сварки температур воздуха. Расчет технологических параметров сварки проводится на основе математического моделирования теплового процесса сварки с учетом двухфазной зоны, в которой вещество находится как в твердом, так и в жидком состоянии. При этом долю жидкой фазы предлагается определять, используя температурные зависимости количества выделяемой (поглощаемой) при фазовом превращении теплоты, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Предполагая, что предварительный подогрев осуществлен, проведен расчет технологических параметров раструбной сварки полиэтиленовых труб заданного типоразмера при температуре окружающего воздуха ниже нормативного. Показано, что эффективным является охлаждение сварного соединения в теплоизоляционной камере с прослойкой воздуха, по сравнению с использованием слоя теплоизоляции.

Охлаждение в теплоизоляционной камере расчетного размера позволяет получить динамику температурного поля в зоне термического влияния, характерную при сварке в условиях допустимой температуры окружающего воздуха. Расчеты показывают возможность получения качественного сварного раструбного соединения полиэтиленовых труб при температурах ниже нормативных.

ОЦЕНКА МЕХАНИЗМА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕН ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Андреященко В.А.

*Карагандинский государственный индустриальный университет,
30, пр. Республики, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан,
e-mail: Vi-ta.z@mail.ru*

Среди фундаментальных и прикладных направлений материаловедения наибольшее развитие получило направление, связанное с обработкой металлических материалов с целью измельчения микроструктуры, поскольку это ведет к значительному улучшению их технологических и прочностных свойств. Для субультрамелкозернистых материалов характерен исключительный комплекс механических и эксплуатационных характеристик. В промышленности для измельчения микроструктуры сплавов используются различные традиционные методы, относящиеся к монотонным методам деформационной обработки. Наиболее существенное ограничение монотонных методов – их неспособность обеспечить получение субультрамелкозернистых материалов с высокой долей большеугловых границ зерен и относительно изотропными механическими свойствами. Это ограничение действует и при низких, и при высоких гомологических температурах.

Вид нагружения оказывает влияние на кинетику микроструктурной эволюции и на однородность получаемой микроструктуры. Этот эффект используется в методах интенсивной пластической деформации, в частности при немонотонном нагружении, примером которого является всесторонняя ковка.

Создание в обрабатываемых материалах субультрамелкозернистой структуры в условиях промышленного производства на данном уровне развития науки и техники затруднено. Понимание механизма измельчения зерен при интенсивной пластической деформации позволит реализовать процесс получения субультрамелкозернистых материалов в промышленных условиях.

Цель настоящей работы – анализ и оценка механизма измельчения зерен при интенсивной пластической деформации методом мультиосевойковки.

Реализация ИПД осуществлена методом мультиосевойковки заготовок из сплавов на основе меди, алюминия и конструкционной стали. В ходе проведения исследований было использовано деформирование на 30 % от вертикального размера заготовки при единичном обжатии. Выполнен один полный цикл деформирования, включающий поочередное обжатие соответственно по осям x , y и z . Смена направлений осадки осуществлялась после каждого обжатия с кантовкой образца на 90° , что обеспечило немонотонный характер развития деформации. Деформирование осуществлялось при комнатной температуре. После обработки была изучена эволюция микроструктуры образцов из сплавов на основе меди, алюминия и железа. При этом проведение отжига способствовало стабилизации микроструктуры. Анализ эволюции микроструктуры показал, что при реализации мультиосевойковки наблюдается измельчение зерен, при этом форма зерна искажается по аналогии с искажением слоев самой заготовки. В зернограницных областях происходит формирование более тонких, субзеренных границ, после чего они начинают преобразовываться в зеренные границы, что в свою очередь приводит к измельчению зерен по всему объему заготовки. Следует отметить, что на всех изученных образцах наблюдаются четкие линии сдвига, расположенные под углом $\sim 45^\circ$ к оси приложения нагрузки и к границе зерна. С увеличением суммарной степени деформации происходит насыщение структуры линиями сдвига.

Также был изучен процесс структурообразования сильнодеформированной холоднокатаной тонколистовой стали марки 08кп при рекристаллизационном отжиге в лабораторных условиях. Исследование микроструктуры выполнено с варьированием времени выдержки при рекристаллизационном отжиге с шагом 1 мин, что позволило отследить процесс образования новых рекристаллизованных зерен из волокнистой деформированной структуры. Про-

ведение аналогии процесса структурообразования при рекристаллизационном отжиге холоднокатаной стали обладающей волокнистой структурой, и металлических материалов, структура которых насыщена линиями сдвига, образованными в результате реализации интенсивной пластической деформации, позволяет сделать вывод о прямой зависимости величины зерна, полученного в результате обработки от расстояния между линиями сдвига, образованными в результате этой обработки.

Таким образом, для получения субультрамелкозернистой структуры необходимо реализовывать обработку так, чтобы максимально насытить структуру металла линиями сдвига, при этом дисперсность образованной субультрамелкозернистой структуры будет пропорциональна расстоянию между линиями сдвига.

ВЛИЯНИЯ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ МАРКИ А85

Анучина Е.А., Загуляев Д.В., Громов В.Е.

Сибирский государственный индустриальный университет,
д. 42, ул. Кирова, г. Новокузнецк, 654007 Российская Федерация,
e-mail: anuchina_elen_a_1996@mail.ru

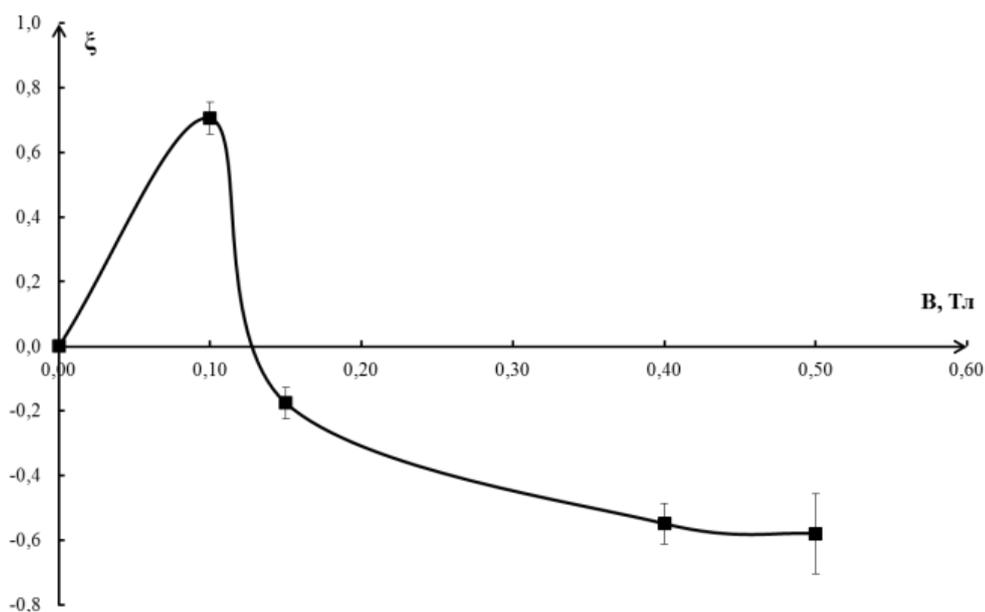
Исследование процесса ползучести как одного из видов пластической деформации прежде всего диктуется требованиями практики, поскольку она определяет работоспособность используемых в технике различных элементов во многих конструкциях, механизмах и устройствах. Ползучесть позволяет с большой точностью оценить основные характеристики применяемых материалов, а также широко используется в технологических процессах [1].

Цель работы – изучить влияния слабых магнитных полей на ползучесть алюминия А85. Химический состав, которого представлен ниже в таблице.

Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn
до 0,08	до 0,06	до 0,01	99,85	до 0,01	до 0,02

Для проведения исследований использовались образцы цилиндрической формы, диаметром 2 мм и длиной 250 мм из поликристаллического технически чистого алюминия марки А85 [2]. Испытания на ползучесть проводили без воздействия и с воздействием магнитного поля, при этом индукция магнитного поля варьируется от 0 до 0,5 Тл.

Установлено, что магнитное поле существенно влияет на величину деформации до разрушения. Выявлено, что без воздействия магнитного поля степень деформации $\varepsilon = 26\%$, а с воздействием магнитного поля 0,15 Тл $\varepsilon = 33\%$, степень деформации для образца, разрушенного в условиях воздействия магнитного поля 0,5 Тл, составляет $\varepsilon = 35\%$. Время, необходимое для достижения одной и той же степени деформации, различно для разных параметров воздействия магнитным полем: для образца, разрушенного в обычных условиях, составляет 1,5 ч; для образца, разрушенного под действием магнитного поля 0,15 Тл, – 2,5 ч, а для образца, разрушенного под действием магнитного поля 0,5 Тл, – 4 ч.



Зависимость относительного изменения скорости ползучести ξ от индукции магнитного поля B

Из представленной на рисунке зависимости σ (В) следует, что эффект влияния магнитного поля неоднозначен: происходит как возрастание скорости ползучести с достижением максимального значения при $B = 0,10$ Тл, так и ее замедление с достижением минимального при $B = 0,50$ Тл [3].

Таким образом, была выявлена зависимость относительного изменения скорости ползучести алюминия от величины индукции магнитного поля. Установлен знакопеременный характер зависимости относительного изменения скорости ползучести алюминия σ от индукции магнитного поля. Показано, что в интервале значений индукции магнитного поля $B \leq 0,1$ Тл значения скорости ползучести увеличиваются, а время, необходимое для разрушения, снижается. В интервале $B > 0,10$ Тл скорость ползучести уменьшается, время увеличивается.

Заключение

Проанализировав кривые ползучести, можно судит о том, что магнитное поле может в значительной мере повлиять на скорость ползучести алюминия. Как видно из полученных данных, магнитное поле 0,5 Тл существенно увеличивает скорость ползучести, это может говорить о том, что материал становится более пластичным в условиях воздействия магнитным полем 0,5 Тл.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания 3.1283.2017/4.6

Литература

1. Клыпин, А. А. О влиянии магнитного и электрического полей на ползучесть / А. А. Клыпин // МиТОМ. – 1973. – № 8. – С. 2–6.
2. Вашуль Х. Практическая металлография. Методы приготовления образцов: Пер. нем. – М.: Металлургия, 1988. – 320 с.
3. Загуляев, Д.В. Влияние слабых магнитных полей на микротвердость и ползучесть алюминия: дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк, 2011. 146 с.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ И КАТАСТРОФИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

Ахметов А.Ж.^{1,2}, Кульков А.С.^{1,2}, Смолин И.Ю.^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, Томск, 634050, Российская Федерация

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, Академический пр., Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

Исследование неупругой деформации и поврежденности горных пород является основой прогноза устойчивости горных массивов, необходимого для безаварийного ведения подземных работ. Развитие пластических деформаций и образование трещин в горных породах и массивах происходит на разных масштабных уровнях, что обусловлено иерархической структурой горной среды.

Цель работы – определение очагов зарождения пластических деформаций и катастрофических разрушений на мезоуровне с помощью компьютерного моделирования на основе эволюционного подхода нелинейной динамики [1].

При подготовке данных для проведения расчетов были построены структурные модели образцов мрамора на основе снимков, полученных с помощью растрового электронного микроскопа. В качестве элементов структуры мрамора были выделены зерна карбонатов, имеющие разные физико-механические свойства, а также поры, содержание которых не превышает 8–9 %.

Для проведения численного эксперимента были использованы структурные модели образцов мрамора с размером порядка 0,15×0,15 см. Они отличались по размерам зерен, их конфигурации, количеству и распределению пор. С применением данных моделей были проведены численные расчеты на основе конечно-разностного метода Уилкинса в двумерной постановке в условиях плоской деформации с применением упругопластической модели Друккера–Прагера–Николаевского, а также комбинированного критерия разрушения, описанных в работах [2, 3].

Показано, что очаги разрушения зарождаются около пор. Если пор нет, то зарождение разрушения происходит от границ образца. В мезообъеме без пор сначала развиваются локализованные пластические деформации в менее прочных зернах вблизи границ зерен, а после образования областей разрушения (трещин) возле них появляются локализованные пластические деформации. В пористых образцах сначала развиваются области разрушения, а затем возле них образуются локализованные пластические деформации.

Исследования указанных особенностей формирования и развития зон локализованной неупругой деформации и разрушения направлены на решение фундаментальной проблемы – безопасности ведения горных работ, а также распознавания катастрофических явлений в горных массивах.

Литература

1. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. – Новосибирск : Академич. изд-во «Гео», 2007. – 235 с.
2. Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. – М. : Мир, 1967. – С. 212–263.
3. Николаевский В. Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности // Механика твердых деформируемых тел. Т. 6. Итоги науки и техники. М. : ВИНТИ АН СССР, 1972. – С. 5–85.

КОМПАКТИРОВАНИЕ БРИКЕТА В КОНТЕЙНЕРЕ, СНАБЖЕННОМ МАЛОЙ КОНУСНОСТЬЮ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Логинов Ю.Н.¹, Бабайлов Н.А.², Полянский Л.И.³, Первухина Д.Н.¹

¹Уральский федеральный университет, 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: j.n.loginov@urfu.ru

²Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: babailov@imach.uran.ru

³ЗАО «Спайдермаш», 54, ул. Студенческая, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: info@spidermash.ru

Валковое брикетирование сыпучих сред является наиболее производительным процессом обработки [1], но размеры полученных брикетов иногда оказываются недостаточно большими, что обусловлено спецификой условий захвата валковыми системами. Получение брикетов больших размеров заставляет применять плунжерное брикетирование. Моделирование процессов компактирования сыпучих сред в закрытом контейнере обсуждалось в работах [2–4].

Цель работы – оценка влияния конфигурации прессового инструмента на деформированное состояние брикета, получаемого методом плунжерного формования.

При уплотнении сыпучих сред в контейнере могут применяться специальные приемы, позволяющие повысить эффективность процесса. Определенную роль играет форма полости контейнера. В простейшем случае эта форма представляет собой цилиндрическую поверхность.

Одна из проблем, возникающих при таком порядке действий, заключается в том, что при выпрессовывании на границе контакта с полостью контейнера могут возникать расслоенные трещины. Их возникновение связано с упругим расширением заготовки после снятия напряжений сжатия с ее контура. Для ликвидации трещин применяют контейнеры с полостью, выполненной с малой величиной конусности. Напряженно-деформированное состояние такого варианта прессования отличается от обычного. Для моделирования процесса прессования сыпучей среды использовали программный комплекс ABAQUS (ABAQUS, Inc. и DS. © Dassault Systèmes, 2007).

Модель среды (porous metal plasticity model) имеется в интерфейсе программного модуля и описывается условием текучести Gurson. Относительное перемещение пуансона равно $\Delta h/h_0 = 0,1$. Такая деформация является малой, но полученное решение позволяет понять, какие параметры напряженно-деформированного состояния изменяются при замене цилиндрической поверхности контейнера на коническую.

Как отмечалось в [5], в слишком длинном контейнере за счет погашения напряжений сжатия напряжениями трения может появиться жесткая зона, размер которой зависит от соотношения размеров брикета, коэффициента трения и соотношения характеристик объемного и сдвигового упрочнения уплотняемой среды.

После решения задачи выявлено, что закономерности распределения относительной плотности соответствуют тем же при прессовании цилиндрического брикета, но зона максимальной плотности стала больше. Кроме того, в других зонах сами значения плотности оказались выше. Объяснение этому явлению лежит в анализе поля перемещений для этих двух случаев прессования. При отсутствии трения радиальные составляющие перемещения должны быть близки к нулю. Этот факт был проверен выполнением процедуры решения задачи. Однако при повышенном трении перемещения достаточно велики и находятся в диапазоне $-0,54...+0,40$, что составляет около 5 % от обжатия Δh .

При переходе к прессованию с высоким коэффициентом трения компонента вектора перемещения приобретает зависимость от радиальной координаты. Ближе к периферии вертикальные перемещения уменьшаются, при этом в центральных слоях они становятся больше. Таким образом, более значимым фактором для формирования деформированного со-

стояния является трение, а не конусность полости контейнера. По крайней мере, это касается малых величин конусности, на уровне 2° .

Расчеты напряженно-деформированного состояния, выполненные методом конечных элементов, показали, что наличие конусности на уровне 2° приводит к перераспределению объемных деформаций. Увеличиваются объемы брикета, обладающие повышенной плотностью. Расчеты, выполненные для различных значений коэффициента трения, показывают, что трение остается решающим фактором, создающим неоднородность распределения плотности.

Литература

1. Loginov Y. N., Bourkine S. P., Babailov N. A. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 118, iss. 1–3. – P. 151–157.
2. Zalazinskii A. G., Polyakov A. P. Model of a plastically compressible material and its application to the analysis of the compaction of a porous body // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2002. – Vol. 43, iss. 3. – P. 457–466.
3. Bazhin V. Yu., Savchenkov S. A., Kosov Ya. I. Specificity of the titanium-powder alloying tablets usage in aluminium alloys // *Non-ferrous Metals*. – 2016, iss. 2. – P. 52–56.
4. Industrial recycling of technogenic wastes and mineral ore processing / L. I. Polianski, N. A. Babailov, Yu. N. Loginov, D. N. Pervukhina // *Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*. – 2016. – P. 040046-1–040046-4.
5. Loginov Yu. N. Evaluation of the effect of technological parameters on the size of the nondeformable zone when pressing a porous workpiece in a container // *Steel in Translation*. – 2001. – Vol. 31, iss. 11. – P. 63–68.

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МНОГОПРОХОДНОГО ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ

Шишин Н.Н.¹, Бабайлов Н.А.²

¹Филиал ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

д. 1, ул. Рабочей молодежи, г. Верхняя Салда, 624760, Российская Федерация

²Институт машиноведения УрО РАН,

д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,

e-mail: babailov@imach.uran.ru

Цель представленной работы – разработка интерактивного технологического калькулятора – специальной программы для расчета технологических и энергосиловых параметров в различных процессах обработки металлов давлением: например в процессах многопроходного волочения проволоки (из многослойной композиционной заготовки), в том числе из цветных металлов и сплавов.

Программа расчета параметров многопроходного волочения проволоки и прутков подготовлена в рамках выполнения курсовой НИР и ВКР студента УрФУ Н.Н. Шишина, а также выполнена в рамках государственного задания по теме № 01201375904 [1, 2].

Технологический калькулятор представляет собой программное приложение для Windows XP, 7, 8 и 10, который является удобным, практичным программным средством для выполнения технологических расчетов и анализа исследуемых процессов обработки металлов (на рисунке приведено одно из окон вывода результатов расчета). Рабочим инструментом для разработки программы выбран язык программирования C Sharp (C#). Интерактивный калькулятор имеет понятный для пользователя интерфейс и позволяет быстро выполнить требуемые технологические расчеты.

Заполните строки указанные ниже	
Среднее сопротивление деформации в проходе (σ)	138 МПа
Диаметр до прохода (d_0)	1,56 мм
Коэффициент трения (μ)	0,05
Полуугол волоки (α)	6°
Диаметр после прохода (d_1)	1,38 мм

Результат выполнения программы

$\sigma = 138$ МПа	$\alpha = 6^\circ$
$d_0 = 1,56$ мм	$d_1 = 1,38$ мм
$\mu = 0,05$	Сила волочения $P = 74,689$ МПа

Выполнить Очистить

В работе выполнены расчеты технологических режимов многопроходного волочения проволоки, с учетом неравномерной деформации слоев металла. Здесь выполнен учет геометрических характеристик деформирующего инструмента, условий трения на контакте инструмента и деформируемого металла, а также изменения механических свойств для слоев деформируемого металла. Механические свойства металла слоев проволоки выбирают из специального справочника, представленного в программе, в зависимости от степени, скорости и температуры деформации.

Перспективой проекта можно считать разработку ряда специальных интерактивных программ (интерактивных технологических калькуляторов) или дополнительных программных модулей по определению технологических и энергосиловых параметров в других процессах обработки металлов давлением, например при различных видах прокатки,

штамповке и др.

Литература

1. Шишин Н. Н., Бабайлов Н. А. Технологические калькуляторы для определения энергосиловых параметров прессования и волочения / Сборник научных трудов XVI Международной научно-технической Уральской школы-семинара молодых ученых-металловедов. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – Том 2. – С. 221–223.
2. Shishin N. N., Babailov N. A. The Calculator to Determine the Power-Energy Parameters of Metal Extrusion // Сборник материалов X международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2016. – С. 342.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Бережной Д.В., Шамим М.Ф., Балафендиева И.С., Секаева Л.Р.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
18, Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,
e-mail: [bereznoi.dmitri@mail.ru](mailto:berezhnoi.dmitri@mail.ru), shamimta@aol.com, e_xo@mail.ru, lrsekaeva@kpfu.ru*

В работе в рамках геометрически нелинейного подхода к описанию деформирования проводится исследование поведения многослойного элемента обтекателя при термосиловом нагружении. За конечные деформации принимаются три деформации удлинений и три составляющие сдвиговых деформаций, которые носят название «истинных». Вводятся в рассмотрение так называемые «истинные» (по В.В. Новожилову) напряжения, отнесенные к единицам соответствующих площадей после деформации тела. В соответствии с «глобально инкрементальной теорией Лагранжа», процесс деформирования представляется в виде последовательности равновесных состояний при соответствующих уровнях нагружения [1].

Задача контактного взаимодействия деформируемых тел в рамках их конечно-элементной аппроксимации решается на основе использования специальных контактных конечных элементов со специфическими свойствами [2]. Для моделирования оболочки используется конечный элемент в виде искривленного параллелепипеда, состоящий из набора слоев по толщине, каждый из которых является ортотропным материалом. Вводятся ковариантные компоненты деформаций, при вычислении которых через перемещения используется метод двойной аппроксимации деформаций.

Расчетная область представляет собой многослойную усеченную коническую оболочку, которая первоначально нагревается по части внешней поверхности вдоль образующей постоянным давлением, а затем медленно нагревается, в процессе чего конструкция теряет устойчивость. Исследуется влияние условий кинематического закрепления оболочки, причем могут быть закреплены как различные участки торцевых поверхностей оболочки, так и реализованы условия контактного взаимодействия с жестко закрепленными стальными коническими шайбами, на которые насаживается оболочка перед нагружением [3]. При этом сам процесс насадки также реализуется в рамках процесса контактного взаимодействия.

Также исследуется возможность замены многослойной оболочки на однослойную с приведенными упругими модулями. Можно отметить, что в данной задаче использование однослойной схемы для моделирования оболочки занижает температуру, при которой происходит процесс потери устойчивости, а максимальные сжимающие напряжения в слоях выше. При контактном закреплении оболочки через шайбы температура потери устойчивости падает на четверть, причем характер распределения напряжений в оболочке в момент нагружения перед потерей устойчивости существенно другой.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности 9.9786.2017/8.9

Литература

1. Bereznoi D.V., Paimushin V.N., Two formulations of elastoplastic problems and the theoretical determination of the location of neck formation in samples under tension // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – Vol. 75. – Iss. 4. – 2011. – pp. 447–462.
2. Dmitri V. Bereznoi, Reza Shamim and Irina S. Balafendieva Numerical modeling of mechanical behavior of clinch connections at breaking out and shearing // MATEC Web of Conferences, 2017, Vol. 129, 03023
3. Shamim M.R., Bereznoi D.V., Investigation of deformation at a centrifugal compressor rotor in process of interference on shaft // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, Vol. 158, 012083.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФРИКЦИОННЫХ РАЗЪЕМОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Бережной Д.В., Шамим М.Ф., Балафендиева И.С., Саченков А.А., Сюй Инцянь

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
10, Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,
e-mail: [bereznoi.dmitri@mail.ru](mailto:berezhnoi.dmitri@mail.ru), shamimta@aol.com, e_xo@mail.ru,
sarga1507@mail.ru, xyq_1988@hotmail.com*

В рамках конечно-элементной методики реализован подход к решению задач создания фрикционных разъемов. В рамках геометрически нелинейного подхода к описанию деформирования на основе определяющих соотношений между приращениями истинных напряжений и деформаций дана статическая постановка упругопластических задач трехмерных конструкций сложной геометрии. Алгоритм решения построен на основе «модифицированного подхода Лагранжа» к описанию движения [1–3]. На основе предложенной методики решена трехмерная задача деформирования фрикционного разъема при его создании и эксплуатации.

Статичный элемент фрикционного разъема представляет собой толстостенный трехмерный цилиндр с симметрично расположенными продольными секторальными прорезями. Штырь разъема – толстостенный цилиндр, внешний радиус которого совпадает с внутренним радиусом статичного элемента разъема. Расчет производился в несколько этапов. На первом этапе статичный элемент разъема жестко закреплялся по одному из торцов, а к другому торцу пошагово прикладывался осевой момент кручения. На втором этапе соосно статичному элементу разъема непосредственно рядом моделируется штырь разъема, вставляется и вытаскивается из статичного элемента разъема. Для материала статичной части разъема принимается модель упругопластического тела с изотропным упрочнением.

Было исследовано влияние величины угла закручивания неподвижной части разъема при его создании и температурного режима при эксплуатации на максимальную величину вырывного усилия штыря при их разъединении, определены зависимости изменения вырывного усилия от величины смещения штыря при соединении и разъединении фрикционного разъема.

Таким образом, реализованная методика позволяет определять усилия извлечения штыря из разъема в зависимости от угла начального закручивания статичной части разъема. Можно отметить, что предложенная авторами методика расчета нелинейного поведения элементов трехмерных подконструкций позволяет адекватно описывать процессы упругопластического деформирования и контактного взаимодействия, реализующиеся в реальных практических конструкциях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научных проектов № 18-41-160018, №18-41-160021.

Литература

1. Bereznoi D.V., Paimushin V.N., Two formulations of elastoplastic problems and the theoretical determination of the location of neck formation in samples under tension // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – Vol. 75. – Iss. 4. – 2011. – pp. 447–462.
2. Dmitri V. Bereznoi, Reza Shamim and Irina S. Balafendieva Numerical modeling of mechanical behavior of clinch connections at breaking out and shearing // MATEC Web of Conferences, 2017, Vol. 129, 03023
3. Shamim M.R., Bereznoi D.V., Investigation of deformation at a centrifugal compressor rotor in process of interference on shaft // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, Vol. 158, 012083.

ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ФОНТАННОЙ АРМАТУРЫ И ТРУБОПРОВОДОВ ГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА СТАДИИ ПАДАЮЩЕЙ ДОБЫЧИ

Балина О.В., Насонов В.В.

*Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: balina_olga@inbox.ru*

На стадии падающей добычи давление газа значительно снижается и не оказывает существенного влияния на процессы старения и деградации материалов оборудования, а основные повреждения возникают из-за действия климатических факторов. Особенно это актуально для месторождений, находящихся в субполярной климатической зоне, характеризующейся холодной и продолжительной зимой, большим количеством осадков, сильными ветрами, повышенной влажностью, низкой среднегодовой температурой воздуха. Такие климатические условия увеличивают статические и циклические нагрузки на оборудование. Однако, как правило, эти особенности практически не учитываются при проведении плановой диагностики и определения остаточного ресурса оборудования.

Поэтому целью данной работы является изучение влияния климатических факторов на процессы накопления эксплуатационных повреждений металлоконструкций.

Для оценки усталостных повреждений фонтанной арматуры и трубопроводов проведены диагностические мероприятия и проанализированы диспетчерские данные о суточных колебаниях давления, изменениях температуры окружающей среды, частоте порывов ветра, количестве осадков в зимний период за 10 лет эксплуатации.

Результаты проведенных исследований показали, что вероятность разрушения линейной части трубопровода за счет колебаний внутреннего давления составляет не более 10^{-4} на километр в год, а за счет ветровой и снеговой нагрузки это показатель увеличивается до 2×10^{-3} на километр в год. Наибольший вклад в возможность разрушения трубопровода вносят циклические температурные напряжения в области компенсаторов, в этом случае вероятность разрушения составляет 5×10^{-3} для каждого компенсатора.

Вероятность разрушения фонтанной арматуры за счет изменений внутреннего давления газа не превышает значения 10^{-4} , а влияние порывов ветра до 40 м/с увеличивает это значение до 10^{-3} , при этом наиболее опасным участком является область перехода колонной головки к трубе.

Таким образом, по расчетным и диагностическим данным, можно сделать вывод о статистически значимом влиянии климатических факторов на вероятность разрушения объектов контроля.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПРИ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Банников М.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
д. 1, Ак. Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: mbannikov@icmm.ru*

В работе приведено описание современных представлений о механизмах зарождения необратимых циклических сдвигов как структурно индуцированных пластических сдвиговых деформаций [1], являющиеся в общем случае частью накапливаемой пластической деформации, которые приводят к образованию усталостных трещин. Приведена методика «in situ» определения накопления необратимых усталостных повреждений с помощью анализа нелинейных проявлений сигнала обратной связи в замкнутой системе ультразвуковой усталостной установки [2] на основе измерения амплитуды колебаний свободного торца образца. В режиме сверхмногоциклового (гигациклового) усталости проявляются аномалии упругих свойств материала, вызываемые накоплением повреждений которые уменьшают упругий модуль материала, что приводит к эффекту нелинейности в амплитуде колебаний. Данный эффект возрастает с иницированием и ростом усталостной трещины. Методика была применена к образцам из титана, железа, сплавов алюминия при различном уровне среднего напряжения для определения момента иницирования и роста усталостной трещины в режимах много- и гигациклового усталости. Показано, что методика применима для раннего обнаружения усталостных трещин при циклическом нагружении в ультразвуковом режиме, как на поверхности, так и внутри материала. Обнаружены различные закономерности возрастания коэффициента нелинейности, которые связаны с различными механизмами перераспределения внутренних напряжений в процессе испытаний. Поверхность разрушения анализировали с помощью профилометра New View для оценки коэффициентов масштабной инвариантности в процессе накопления повреждений [3].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №: 16-41-590892, 16-48-590534.

Литература

1. Experimental and theoretical study of multiscale damage-failure transition in very high cycle fatigue / V. I. Betekhtin, A. G. Kadomtsev, M. V. Narykova, M. V. Bannikov, O. B. Naimark, S. G. Abaimov, I. S. Akhatov, T. Palin-Luc // *Physical Mesomechanics*. – 2017. – Vol. 20, no. 1. – P. 78–89.
2. In situ characterization of fatigue damage evolution in a cast Al alloy via nonlinear ultrasonic measurements / A. Kumar, C. J. Torbet, T. M. Pollock, J. W. Jones // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58. – P. 2143–2154.
3. Bannikov M. V., Naimark O. B., Oborin V. A. Experimental investigation of crack initiation and propagation in high- and gigacycle fatigue in titanium alloys by study of morphology of fracture // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2016. – Vol. 35. – P. 50–56. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.35.06.

ФРИКЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ПРУЖИННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бараз В.Р., Федоренко О.Н., Андрианов И.В.

*Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: vrbaraz@mail.ru*

Для пружинных материалов, изготавливаемых из проволочных или ленточных заготовок, обоснованное внимание могут привлекать технологии, позволяющие целенаправленно обеспечивать поверхностное упрочнение. Среди них очевидный интерес представляет поверхностная пластическая деформация путем трения скольжения. Подобная обработка может рассматриваться в качестве перспективного метода упрочнения широкой номенклатуры пружинных материалов из проволочных и ленточных заготовок, испытывающих в условиях изгибного или крутящего нагружения преимущественное деформирование поверхностных слоев.

При фрикционной обработке в режиме трения скольжения создается сложная схема напряженного состояния – при высоком давлении помимо сдвиговой деформации, осуществляемой скольжением и двойникованием, может развиваться также ротационная (поворотная) деформация. Это приводит к очень сильной пластической деформации, сопровождающейся не только аномально высоким фрагментированием зерен, но и их кристаллографическим разворотом с высокоугловой разориентацией. В результате в поверхностном слое изделий возникают ультрадисперсные, в том числе и нанокристаллические структуры. Наличие у возникающих в зоне фрикционного контакта структур особых свойств позволяет рассматривать такую упрочняющую обработку в качестве перспективного способа улучшения эксплуатационно важных характеристик упругих материалов.

Проведено изучение фрикционной обработки ленточных заготовок из пружинных материалов различного химического состава – сталей мартенситного и аустенитного классов (соответственно стали 70С2ХА и 12Х17Н8Г2СМФ), а также сплава на медной основе, относящегося к группе бериллиевых бронз (БрБНТ1,7).

Электронно-микроскопическим исследованием установлено, что деформация трением способствует формированию в поверхностном слое ленты сильно фрагментированной микроструктуры, по размерам приближающейся к нанометрическому масштабу. Такая обработка способствует деформационному упрочнению поверхностного слоя, что выражается в повышении условного предела упругости и микротвердости, а также эффективным образом влияет на возрастание усталостных и релаксационных свойств.

Создана установка для экспериментального исследования влияния технологических факторов на упрочнение ленточных образцов, основанная на модели деформирования путем протягивания длинномерной ленточной заготовки через закрепленные инденторы-валки. Установка позволила провести опыты по отысканию оптимальных режимов обработки ленточных образцов фрикционным деформированием с учетом влияния приложенной нагрузки (действующей силы в зоне контакта), радиуса закругления инденторов-валков и числа проходов.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С РАЗЛИЧНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Радченко П.А., Батуев С.П., Радченко А.В., Плевков В.С.

*Томский Государственный Архитектурно-Строительный университет
2, пл. Соляная, г. Томск, 634003, Российская Федерация,
e-mail: SPBatuev@gmail.com*

В работе представлены результаты комплексного экспериментально-численного исследования разрушения армированной балки из бетона и фибробетона при кратковременном динамическом воздействии. Экспериментальные исследования были проведены на кафедре железобетонных и каменных конструкций ТГАСУ следующим научным коллективом: В.С. Плевков, Д.Г. Уткин и К.Л. Кудяков. Экспериментальные исследования проводились на копровой установке. При помощи бомбосбрасывателя на исследуемый образец сбрасывался груз весом 0,45 т с высоты 0,7 м. В экспериментах величина динамической нагрузки определялась с помощью датчика силоизмерителя. В численных расчетах воздействие груза на балку заменялось импульсом. Зависимость импульса от времени определялась из эксперимента. В работе был проведен анализ влияния арматурного упрочнения на схемы деформирования и разрушения балки. Также проведено сопоставление полученных экспериментальных и численных результатов.

В работе показаны результаты математического моделирования деформирования и разрушения защитной оболочки атомной станции при динамическом нагружении. Защитная оболочка представляет собой конструкцию со сложной сотовой структурой. Сотовая структура состоит из бетона с применением углеродной фибры. Оболочка включает в себя восемь секторов, скрепленных между собой стальными фермами. Было проведено численное исследование поведения данной конструкции под воздействием падающего самолета.

И в работе рассмотрены численные исследования характера разрушения изгибаемых бетонных элементов со стержневым композитным армированием. В результате получены схемы разрушения и трещинообразования, максимальная величина нагрузки и максимальный прогиб элемента. Проведено сравнение численных и экспериментальных результатов между собой.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Бутманов Д.Д., Банников М.В., Баяндин Ю.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
1, Ак. Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: buv@icmm.ru*

В настоящее время интенсивно развивается применение аддитивных технологий в различных отраслях промышленности. Аддитивные технологии находят широкое применение в прототипировании моделей и будущих изделий: в литейном производстве для изготовления форм, в медицине для изготовления имплантатов и протезирования, а также во многих других приложениях. Одним из самых популярных является послойное наплавление (FDM), при котором модель формируется послойной укладкой расплавленной нити (пластик, металл, воск и др.). Распространенными материалами для 3D-принтеров являются термопластичные полимеры, которые практически не меняют свои физико-механические характеристики после отверждения. Интерес представляет изучение деформационных и прочностных свойств получаемого при печати образца, который с точки зрения механики является послойной конструкцией с определенным чередованием типа укладки нити и различного процента заполнения. При этом различные термопластичные материалы обладают своими отличительными особенностями, некоторые из них являются более пластичными, другие проявляют более высокие прочностные характеристики. Цель настоящей работы – исследование упругих и прочностных свойств нескольких материалов, которые доступны на отечественном рынке. В работе исследовано пять видов доступных материалов: акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), модифицированный гликолем полиэтилентерефталат (PETG), термопластичный эластомер (TPE), полилактид (PLA), сополимер бутадиена и стирола (SBS). Пластик ABS более распространен и имеет большие упругие и прочностные характеристики по сравнению с другими, а применение PLA обусловлено его экологическими свойствами. Термопластичные эластомеры, которые представляют собой комбинацию эластомера и термопласта, объединяют в себе свойства резины и пластика. Альтернативными по отношению к ABS и PLA являются пластики PETG и SBS, которые сравнительно недавно появились на рынке, последнему отдается предпочтение в инженерных и механических приложениях, так как он более гибкий и имеет удлинение на разрыв более 250 %.

Стандартные образцы для испытаний на растяжение были изготовлены на 3D-принтере «Flying bear p902» со 100 % заполнением пластика. С целью изучения влияния типа укладки на механические свойства по отношению к направлению растяжения печать производилась в двух направлениях: горизонтальное расположение образца (укладка вдоль образца) и вертикальное расположение образца (укладка слоев по сечению образца). Испытания проводились в ИМСС УрО РАН на гидравлической разрывной машине BIS-100 в условиях квазистатического растяжения со скоростью 1 мм/мин. Было установлено, что модуль упругости образцов при растяжении снижается в 2–3 раза по отношению к значениям исходных материалов, из которых печатались образцы. Самым прочным оказался PLA (~55 МПа), ниже предел оказался у PETG (~45 МПа) и ABS (~30 МПа). Термопластичный эластомер TPE и сополимер SBS имеют низкий предел (~13 МПа), но при этом подвергаются большим деформациям в силу своего состава. Также было установлено снижение характеристик для образцов, напечатанных вертикально, что связано с адгезией и отрывом слоев.

ДИСКРЕТНЫЙ И КОНТИНУАЛЬНЫЙ ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ СЛУЧАЙНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

Беляев А.К., Полянский В.А., Грищенко А.И., Лобачев А.М., Третьяков Д.А.

*Институт проблем машиноведения РАН,
61, пр. В.О. Большой, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация,
e-mail: vice.ipme@gmail.com, vapol@mail.ru, gai-gr@yandex.ru,
lobachev_am@spbstu.ru, dmitry.tretyakov93@yandex.ru*

Доклад можно условно разделить на две части, объединенные центральной идеей случайного поля микроструктуры материала.

Первая часть предлагает дискретный статический подход к описанию эффекта локализации пластической деформации, известного в литературе как «шахматная доска». С этой целью проведено конечно-элементное моделирование равномерного растяжения полосы из поликристаллического материала в предположении что деформирование каждого из зерен подчиняется билинейному закону с нормальным распределением предела текучести по зернам, без привлечения более сложных закономерностей. Использована модель изотропного материала с одинаковым для всех зерен коэффициентом линейного упрочнения. Анализ проведен для двух случаев (плоское напряженное состояние и трехмерное напряженно-деформированное состояние) и продемонстрирован эффект локализации пластических деформаций в виде множества пересекающихся полос. Основное различие в результатах для плоского напряженного состояния и трехмерного напряженно-деформированного состояния проявляется в среднем расстоянии между полосами деформации и их ширине. При этом исходно плоская поверхность образца приобретает вид «шахматной доски». Тем самым предложено альтернативное объяснение эффекта «шахматной доски» с помощью математической модели поликристаллического материала. Предложенная математическая модель позволяет получить неоднородное квазипериодическое распределение пластической деформации на макроуровне.

Вторая часть посвящена применению динамического континуального подхода к описанию случайной микроструктуры материалов. С этой целью рассматривается распространение одномерной гармонической волны в средах, где как массовая плотность, так и упругий модуль являются независимыми случайными функциями достаточно общего вида. Более того, такая постановка позволит одновременно учесть априорную неопределенность физических параметров микроструктуры материала. Предлагается три подхода к задаче о распространении стохастических волн моделируемых волнами в средах со случайными упругими и массовыми свойствами. Первый подход опирается на идею спектрального разложения по волновым числам. Второй подход оперирует с аппаратом непрерывных марковских цепей, известным также под именем уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК). Наконец, третий подход использует интегральное уравнение Дайсона, известное из статистической физики. Обсуждены достоинства и недостатки каждого подхода. Показано, что эти подходы фактически покрывают все возможные задачи распространения гармонических волн в неоднородных или стохастических средах, следовательно, посредством предварительного анализа рассматриваемой задачи и, имея в виду сильные и слабые стороны каждого подхода, можно выбрать соответствующую стратегию решения. Например показано, что только слабо неоднородные упругие среды могут быть проанализированы в рамках метода интегрального спектрального разложения и ФПК уравнения. Для существенно-неоднородных сред рекомендуется применять интегральное уравнение Дайсона. Следует также отметить, что сравнительный анализ трех подходов к решению поставленной задачи позволяет провести определенную апробацию, как каждого подхода, так и предлагаемой постановки задачи, и тем самым увеличивает степень доверия к полученным результатам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, гранты 17-08-00783 и 18-08-00201.

МЕТОД МНОГОЧЛЕНОВ ГЛАВНЫХ МИНОРОВ В РАСЧЕТАХ АКУСТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В АНИЗОТРОПНОМ СЛОЕ

Беляев Ю.Н.

Сыктывкарский государственный университет,
55, пр. Октябрьский, Сыктывкар, 167001, Российская Федерация,
e-mail: ybelyayev@mail.ru

Нахождение упругих постоянных тонких пленок, исследование критических напряжений в пленках, разработка новых электроакустических преобразователей и некоторые другие проблемы тесно связаны с расчетом напряженно-деформированного состояния пленки, вызываемого упругими волнами. Последняя задача решена в представляемой работе применительно к анизотропному однородному плоскому слою толщиной d , ограниченному изотропными (твердыми или жидкими) средами ($x_3 < 0$ и $x_3 > d$).

Под действием падающей продольной или сдвиговой волны в слое, в общем случае, формируются шесть волн, три из которых направлены в область отражения $x_3 \leq 0$ и три – в область прохождения $x_3 \geq d$. Компоненты вектора смещения u_i , и тензора напряжений p_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ в упругой слоистой среде определяются из решения системы уравнений движения и обобщенного закона Гука. Показано, что зависимость вектор-функции $\psi = \|u_2 \ p_{23} \ u_1 \ u_3 \ p_{13} \ p_{33}\|^T$ от координаты x_3 выражается формулой: $\psi(x_3) = \exp(Wx_3) \psi(0)$, где элементы матрицы шестого порядка W выражаются через компоненты тензора упругой податливости, плотность среды, частоту колебаний ω и углы α , θ_0 , определяющие направление волнового вектора падающей на слой волны. Матрица переноса $T \equiv \|t_{ij}\| = \exp(Wx_3)$ вычислялась по методу многочленов главных миноров:

$$T = \left[\sum_{h=0}^5 \left(\frac{Wx_3}{m} \right)^m \left(\frac{1}{h!} + \sum_{j=6}^{6+N_1} \frac{1}{j!} \sum_{g=0}^h p_{6-h+g} B_{j-1-g}(6) \right) \right]^m,$$

где p_j – коэффициенты характеристического уравнения матрицы Wx_3/m , а $B_g(6)$ – многочлены главных миноров шестого порядка. Необходимая точность вычислений элементов матрицы переноса обеспечивается выбором значений параметра масштабирования m и параметра усечения N_1 .

Получены представления компонент тензора напряжений через элементы матрицы переноса t_{gh} . На примерах кристаллических слоев Si и PbMoO₄ рассмотрены функциональные зависимости $p_{ij} = p_{ij}(x_3, \alpha, \theta_0)$, $i, j = 1, \dots, 6$. Исследуются напряжения на границах пленки $x_3 = 0$ и $x_3 = d$. Проведен сравнительный анализ зависимостей этих напряжений и амплитуд рассеиваемых кристаллом волн от углов α , θ_0 и параметра распространения ωd . Рассмотрены резонансы упругих напряжений при шести волновой дифракции упругих волн.

ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Беляева Н.А., Габов И.П.

*Сыктывкарский государственный университет,
д. 55, пр. Октябрьский, г. Сыктывкар, 167001, Российская Федерация,
e-mail: belyayevana@mail.ru, gabov_92@mail.ru*

Цель работы – применение метода математического моделирования в исследовании влияния вязкости на искомые функции двух видов течений жидкости: сдвиговое между двумя коаксиальными цилиндрами и вращательно-симметричное или течение с закруткой вокруг оси симметрии в цилиндрической области. Рассматриваются случаи постоянной и переменной вязкости. Основой настоящих исследований являются результаты работ [1–4].

Созданы математические модели течений несжимаемой вязкой жидкости с постоянной и переменной вязкостью – уравнения неразрывности и движения, диффузионно-кинетическое уравнение относительно степени структурных изменений, соответствующие граничные условия. В качестве жидкости с переменной вязкостью рассматривается структурированная жидкость.

Численный анализ сдвигового нестационарного течения вязкой жидкости между двумя цилиндрами: внутренний покоится, внешний вращается с заданной скоростью или наоборот, позволяют сделать следующие выводы. В случае постоянной вязкости наблюдается немонокотный характер распределения скорости. Причем с увеличением числа Рейнольдса (уменьшением вязкости) скорость жидкости во внутренних точках области возрастает. Если вязкость является переменной величиной, скорость жидкости является монотонно-возрастающей или монотонно-убывающей функцией. Таким образом, переменная вязкость является стабилизирующим, выравнивающим фактором для скорости течения среды.

Существование широкого спектра вихрей, связанное с закруткой жидкого потока вокруг оси симметрии, подтверждается экспериментально. Некоторые вихревые образования для жидкостей с постоянной вязкостью построены аналитически, например в [4] методом разложения целевой функции модели течения в функциональный ряд.

В случае течения с закруткой проводимые исследования связаны с численным анализом функции тока модели течения на предмет возможных вихревых образований. Основной метод численного анализа – матричная прогонка. Исследования показали существенную зависимость результатов от граничных условий задачи, возможность вихревых образований лишь в случае выполнения условий прилипания текучей среды к граничным поверхностям. Полученные вихревые образования образуют множество вложенных друг в друга замкнутых кривых.

Литература

1. Беляева Н.А. Деформирование вязкоупругих структурированных систем: монография. Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany. 2011. 200 с.
2. Беляева Н.А., Степанова А.С. Течение вязкой структурированной жидкости между двумя цилиндрами // Вестн. Сыктывкарского ун-та. Сер.1: математ., мех., информ. Вып. 14. 2011. С. 95–104.
3. Belyaeva N.A. Axisymmetric flows of non-Newtonian fluids // International conference Days on Diffraction 2015, Abstracts, May 25–29, 2015 St. Petersburg, P. 28.
4. Шмыглевский Ю.Д., Щепров А.В. Точное представление некоторых осесимметричных вихревых образований в вязкой несжимаемой жидкости // ДАН, 2003. Т. 393. № 4. С. 489–492.

ОЦЕНКА ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА РАБОЧИХ ЛОПАТОК В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ПОЗИЦИИ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Бердник О.Б., Царева И.Н., Кириков С.В., Кривина Л.А., Тарасенко Ю.П.

*Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФИЦ ИПФ РАН
д. 85, ул. Белинского, Нижний Новгород, 603024, Российская Федерация,
e-mail: npktribinika@yandex.ru*

При изготовлении и контроле качества готовых рабочих лопаток завод-изготовитель пользуется общепринятыми ГОСТами и Техническими условиями (ТУ) для определения работоспособности при длительной эксплуатации. Если при изготовлении новых изделий предполагается, что материал должен быть однороден по всему объему детали, при определении статических механических характеристик предприятие-изготовитель предлагает анализировать преимущественно замковую часть лопатки. Сами образцы велики и при их испытаниях возможно получить лишь усредненные данные о состоянии материала. Рабочая часть разрывного образца не затрагивает наиболее нагруженные зоны лопатки. Применение данного подхода неприемлемо для лопаток, отработавших назначенный ресурс. Назначение повторного ресурса после проведения исследований по требованиям ТУ может привести к ошибочно завышенным срокам повторной эксплуатации, так как при этом подходе учитывается только состояние внутренних зон материала (или вообще замковой части), а разрушение, как известно, происходит с поверхности и в более термонагруженных частях (входная и выходная кромки перовой части), которые при данном подходе не рассматриваются.

Проведен анализ материала двух рабочих лопаток из жаропрочного никелевого сплава ХН65КМВЮБ: № 1 – с наработкой 12 000 ч (не отработавшая назначенный ресурс 25 000 ч) и № 2–63 000 ч. При рассмотрении возможности дальнейшей эксплуатации лопаток проведены исследования кратковременных испытаний на растяжение материала перовой части. По результатам полученных значений, материал обеих лопаток кондиционный и изделия еще работоспособны. Для детального анализа были проведены релаксационные испытания и анализ микроструктуры. Исследования проведены на образцах, вырезанных из выходной, входной кромок и замковой части лопаток. Анализ предела микропластичности (σ_0) показал, что для лопатки № 1 значения σ_0 находятся на одном уровне (для перовой части $\sigma_0 = 350$ МПа, для замковой части $\sigma_0 = 280$ МПа). Различия в значениях микропластичности для перовой и замковой частей могут отражать изменения в микроструктуре. Сравнивая полученные данные лопатки № 2 получили наименьшее значение предела микропластичности $\sigma_0 = 260$ МПа при удовлетворительном значении предела текучести $\sigma_T = 650$ МПа. Это связано с неоднородностью микроструктуры и деформационным упрочнением сплава в отдельных микроучастках. Проведенные исследования микроструктуры образцов показали, что в материале выходной кромки перовой части процессы старения во время эксплуатации происходят интенсивнее, так как она является наиболее нагруженной. Воздействие высокотемпературного потока приводит к изменениям в микроструктуре: изменению размеров и перераспределению упрочняющих карбидных и интерметаллидных фаз, что влияет на показатели прочностных и пластических характеристик материала данных зон, а именно – снижение всех механических показателей.

Проведенные исследования материала лопаток при разных сроках эксплуатации подтвердили, что подход к оценке технического состояния комплекта и каждой лопатки должен быть индивидуальным, с локальным анализом термонагруженных зон с применением электронно-микроскопических исследований и механических испытаний на микрообразцах. Необходимо заводам-изготовителям и эксплуатационным организациям более тесно сотрудничать с НИИ и вводить новые современные методы контроля на всех стадиях изготовления и эксплуатации ответственных деталей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОРИСТОСТИ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССЕ БРИКЕТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ГУБЧАТОГО ТИТАНА

Березин И.М., Нестеренко А.В., Залазинский А.Г.

*Институт машиноведения УрО РАН
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: berezin@imach.uran.ru*

Процессы уплотнения порошкообразных металлических материалов характеризуются направленным характером строения порового пространства и неравномерным распределением пор в объеме деформируемой заготовки. В результате технологической наследственности процессов пластической обработки многие физико-механические и эксплуатационные свойства порошковых изделий существенно зависят от истории нагружения и схемы напряженного состояния материала при уплотнении [1]. Решение проблемы повышения плотности и равномерности распределения свойств заготовок из некомпактных материалов следует ожидать на основе применения методов пластического деформирования с рациональным уровнем нормальных и сдвигающих напряжений. В связи с этим учет влияния на уплотняемость порошковых материалов механических факторов технологии, прежде всего параметров напряженного состояния, является актуальной задачей.

Цель работы – исследование величины уплотнения порошкового материала на основе губчатого титана в зависимости от изменения условий напряженного состояния в процессах пластического деформирования.

На основе результатов, полученных ранее в работе [2], построено семейство кривых текучести Друкера–Прагера для губчатого титана с различной пористостью на плоскости σ – T . На графике нанесены прямые, соответствующие различным значениям показателя напряженного состояния $k = \sigma/T$, где σ – среднее гидростатическое напряжение; T – интенсивность касательных напряжений. Получено уравнение связи пористости и от величины σ и показателя напряженного состояния k в процессе уплотнения материала в виде $\theta = \theta(\sigma, k)$. Проверка указанного соотношения осуществлена на основе изучения механизма уплотнения материала в процессе брикетирования в закрытой пресс-форме. В качестве материала для исследований использован отсев губчатого титана [3]. Путем электроэрозионной резки спрессованных брикетов вдоль осевого сечения получены плоские образцы (темплеты) малой толщины. На поверхности темплетов выбраны 9 представительных областей для определения локальной поверхностной пористости методом количественной металлографии. Для определения напряженного состояния в объеме заготовки осуществлено конечно-элементное моделирование процесса в системе инженерного анализа Abaqus. Формулировка условия пластического течения сжимаемой среды основана на модели текучести Modified Drucker–Prager Cap model [4]. В зонах осевого сечения модельной заготовки, соответствующих областям экспериментального определения поверхностной пористости темплетов, определяли расчетные значения показателя напряженного состояния k , величины гидростатического напряжения σ и пористости θ . Сравнение результатов, полученных на основе экспериментальных исследований, компьютерного моделирования и уравнения вида $\theta = \theta(\sigma, k)$, показывает возможность применения предлагаемого метода для оценки пористости заготовки в процессе брикетирования порошкового металлического сырья в закрытой пресс-форме.

Литература

1. Шестаков Н. А., Субич В. Н., Демин В. А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. – М. : ФИЗМАЛИТ, 2009.
2. Influence of Stress State Conditions on Densification Behavior of Titanium Sponge / I. Berezin, A. Nesterenko, A. Zalazinskii, G. Kovacs // Acta Polytechnica Hungarica. – 2017. – Vol. 14, no. 6. – P. 153–168.
3. Influence of temperature on compactibility of briquettes of titanium sponge alloyed with hydrogen / A. V. Nesterenko, V. I. Novozhonov, A. G. Zalazinskii, A. V. Skripov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2015. – Vol. 56, no. 3. – P. 287–292.
4. ABAQUS 6.10, Theory Manual. – Providence, United States: Dassault Systemes Simulia Corp., 2010.

УСТАНОВКА СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ

Лехов О.С.¹, Михалев А.В.², Билалов Д.Х.³, Шевелев М.М.⁴

¹ФГАОУ ВО РГППУ, д. 11, ул. Машиностроителей, г. Екатеринбург, 620012, Российская Федерация,

²ОАО «Уралтрубпром», д. 28, ул. Сакко и Ванцетти, г. Первоуральск, 623107, Российская Федерация,

³ФГАОУ ВО РГППУ, д. 11, ул. Машиностроителей, г. Екатеринбург, 620012, Российская Федерация,

⁴ОАО «Уралтрубпром», д. 28, ул. Сакко и Ванцетти, г. Первоуральск, 623107, Российская Федерация,

e-mail: MXlehov38@yandex.ru, master_ddd@mail.ru

На ОАО «Уральский трубный завод» освоена опытная компактная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения полос толщиной 3÷22 мм и шириной 220 мм из стали для сварных труб. Сечение рабочей полости медного водоохлаждаемого кристаллизатора 60×180 мм, высота – 800 мм. Расход воды в контуре охлаждения 30 л/мин. Максимальное усилие деформирования – 2000 кН. Угловая скорость вращения эксцентриковых валов – 110 мин⁻¹. Скорость вытягивания слитка из кристаллизатора – 0,7÷8 м/мин. Усилие вытягивания полосы из кристаллизатора и прижатия тянущих роликов к полосе соответственно равны 20 и 140 кН. Мощность приводного электродвигателя – 200 кВт. Технологический процесс производства стальных листов на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации включает в себя стадии образования в кристаллизаторе стальной оболочки с жидкой фазой, формирования из нее бойками тонкого сляба и его обжатия с высокой степенью деформации за один проход и калибровку готового листа.

При проведении экспериментального исследования установки непрерывного литья и деформации проводили замеры значений тока якоря электродвигателей приводов эксцентриковых валов и тянущего устройства, а так же температуры стенок медного кристаллизатора, полосы и бойков установки. Экспериментальное исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации проводили при получении на опытной установке листа толщиной 6–20 мм из трубной стали, которое позволило оценить конструктивные, технологические, скоростные, энергосиловые параметры установки, определить температуру сляба и получаемого листа и исследовать структуру полученных на установке полос из стали для сварных труб. Толщина тонкого сляба перед обжатием бойками равна 30 мм. Температура сляба, выходящего из медного кристаллизатора, находилась в пределах 1200–1270 °С. Скорость вытягивания сляба из кристаллизатора 1,5 м/мин. Степень деформации тонкого сляба за проход составляла 35–80 %.

С целью изучения структуры листа получаемого на установке непрерывного литья и деформации был выполнен металлографический анализ. Микроанализ показал, что на всех образцах наблюдается характерная для стали марки 20 феррито-перлитная структура с усредненным соотношением объемных долей перлита и феррита 24 и 76 % соответственно. Образцы имеют мелкозернистое строение, причем размер зерна практически одинаков по всей толщине листа и соотнесен в основном с размерными диапазонами № 9 и 10, что предполагает примерно равномерное распределение и достаточно высокие механические свойства металла по сечению листа. Перлит имеет мелкодисперсное зеренное строение. Таким образом, установлено, что установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации позволяет получить лист с мелкозернистой и однородной структурой металла по всему сечению листа.

СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПАР ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Блинов А.В.¹, Боровик С.Ю.², Мухутдинов Ф.И.¹, Секисов Ю.Н.²

¹АО «ОДК-Авиадвигатель», д. 93, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация,

²ИПУСС РАН, д. 61, ул. Садовая, г. Самара, 4430020, Российская Федерация,

e-mail: blinov-av@avid.ru, borovik@iccs.ru

Известно, что в процессе эксплуатации силовых установок, в частности газотурбинных двигателей (ГТД) их элементы конструкций и узлы неизбежно оказываются под воздействием нагрузок, вибраций, тепловых деформаций, подвергаются старению, теряют прочность и вырабатывают свой ресурс. Наибольшему изнашиванию подвергаются пары трения, в частности подшипниковые узлы, которые в том числе определяют ресурс силовой установки в целом. Поэтому прогнозирование остаточного ресурса подшипниковых узлов ГТД является актуальной задачей, решение которой позволит своевременно проводить регламентные работы и исключить аварийные ситуации, связанные с преждевременным их разрушением до достижения расчетного ресурса подшипников [1].

Предлагается экспертный подход к прогнозированию остаточного ресурса подшипниковых узлов ГТД в процессе их эксплуатации на основе сопоставления текущей измерительной информации о состоянии пар трения с результатами расчета соответствующих моделей, проводимых в реальном времени с учетом текущих условий эксплуатации. Структурно-функциональная схема такой системы диагностики и оценки остаточного ресурса пар трения должна содержать подсистему сбора информации о наиболее существенных параметрах, характеризующих внешние воздействия на подшипниковый узел, а также о параметрах, характеризующих изнашивание подшипника; подсистему on-line моделирования изнашивания подшипника; экспертную подсистему оценки остаточного ресурса и предупреждения о приближении к критическому режиму, связанному с разрушением подшипникового узла.

Центральное место в архитектуре системы занимает подсистема сбора информации о состоянии пар трения, так как именно она позволяет судить о реальном состоянии подшипникового узла в текущий момент времени. В качестве источников информации об изнашивании подшипникового узла могут служить частицы металла (ЧМ), вымываемые потоком масла с его рабочих поверхностей. Обнаружение таких ЧМ в потоке масла возможно с помощью оригинального кластерного вихретокового датчика с одновитковым чувствительным элементом [2], установленным в трубопровод системы смазки двигателя. К положительным свойствам системы с таким датчиком относятся возможность выделять и регистрировать единичные ЧМ, одновременно находящиеся в одном сечении маслопровода, ранжировать обнаруженные ЧМ по размерным группам и магнитным свойствам, а также определять линейную скорость движения частиц (скорость потока масла). Дополнительная установка термопары в датчик обеспечивает также измерение рабочей температуры масла.

Вихретоковые датчики с одновитковым чувствительным элементом (одновитковый вихретоковый датчик - ОВТД) могут также служить основой и для систем измерения скоростей вращения и биений валов роторов ГТД [3], которые характеризуют режимы работы силовой установки и могут использоваться в подсистемах on-line моделирования и экспертной оценки остаточного ресурса подшипника. ОВТД устанавливается на статор двигателя так, чтобы его чувствительный элемент находился над лопаточным венцом выбранного для контроля колеса ротора. По времени прохождения выбранной лопаткой зоны чувствительности датчика может быть определен период (частота) вращения ротора, а по изменению в течение одного периода вращения ротора силовой установки радиального зазора между статором и лопаточным венцом можно определить величину биений ротора. Кроме того, подсчет оборотов ротора за весь период эксплуатации подшипника может характеризовать степень отработанного ресурса относительно гарантированного на текущий момент времени.

Таким образом, одновитковые вихретоковые преобразователи могут служить основой для построения систем диагностики состояния пар трения в процессе эксплуатации ГТД, а их дополнение средствами on-line моделирования и экспертной оценки позволит оценить состояние и остаточный ресурс подшипникового узла в каждый текущий момент времени его функционирования.

Литература

1. Отказы двигателей отечественной авиационной техники двигателя. – URL: <http://aviac.ru/engines/777-otkazy-dvigatelye-otechestvennoy-aviacionnoy-tehniki.html>.
2. Преобразование информации в системе контроля частиц износа пар трения на основе группы одновитковых вихретоковых чувствительных элементов / С. Ю. Боровик, Ю. Н. Секисов, А. В. Блинов, Ф. И. Мухутдинов // Турбины и дизели. – 2017. – № 4 (73). – С. 10–17.
3. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. О. П. Скобелева. – М. : Машиностроение, 2011. – 298 с.

ОБ ОДНОЙ МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА

Богачев И.В., Ватульян А.О.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
e-mail: bogachev89@yandex.ru, vatulyan@math.rsu.ru*

Активное использование сложных многосоставных материалов и конструктивных элементов, обладающих одновременно свойствами пьезокерамики и металла, требует создания адекватных моделей, описывающих деформирование и колебания объектов, изготовленных из таких материалов. К таким материалам относятся функционально-градиентные пьезоэлектрики (ФГПЭ), свойства которых непрерывно изменяются относительно координат и могут варьироваться в довольно больших диапазонах. Пьезоэлектрические элементы цилиндрической формы являются одним из наиболее распространенных пьезоэлементов и широко используется в акустическом оборудовании. При моделировании пьезокерамических цилиндров зачастую прибегают к использованию однородных моделей, и в таких случаях методики определения характеристик-констант достаточно хорошо развиты. Однако, при изучении ФГПЭ гипотезы однородности неприменимы, и требуется разработка моделей, учитывающих зависимость характеристик материала от координат. В связи с этим актуальной практической задачей при использовании таких материалов является решение задач идентификации законов изменения их свойств по данным о компонентах электрических и механических полей.

В данной работе представлена методика решения обратной задачи идентификации характеристик ФГПЭ цилиндра с неоднородной поляризацией в радиальном направлении на основе анализа установившихся колебаний, вызванных механической нагрузкой. При этом модули упругости для неполяризованной керамики и диэлектрическая проницаемость считались известными, и требовалось определить законы изменения пьезоэлектрических характеристик как функции радиальной координаты. На практике изменение этих характеристик чаще всего является монотонным, и наибольший интерес представляет задача определения уровня поляризации и характера ее монотонности (возрастание, убывание). Для решения обратной задачи разработан подход, основанный на разложении функции смещения и искомым функций-характеристик по системам линейно независимых функций. В результате пьезоэлектрические характеристики удается восстанавливать в классе линейных функций. Представлен набор вычислительных экспериментов по идентификации для различных законов изменения искомым функций, показывающих, что разработанный подход достаточно эффективен для определения уровня и характера монотонности пьезоэлектрических характеристик цилиндрических конструкций, изготовленных из функционально-градиентных пьезокомпозиций при неоднородной поляризации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-01-00354 А) и Минобрнауки РФ (проект № 9.4726.2017/8.9).

ПРОЧНОСТНЫЕ И ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОБАРИЧЕСКИ СПЕЧЕННЫХ НАНОАЛМАЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Богданов А.С., Богданов Д.Г., Плотников В.А., Макаров С.В.

*Алтайский государственный университет,
90, пр. Красноармейский, г. Барнаул, 656049, Российская Федерация,
e-mail: alexandr-bogdanov@mail.ru*

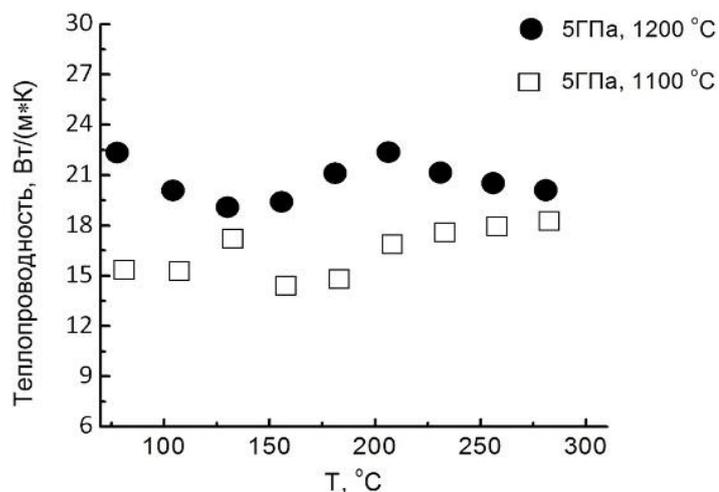
Как известно, алмазы обладают рядом уникальных свойств, таких как высокая теплопроводность, твердость и износостойкость. Совокупность этих свойств делают алмазы привлекательным материалом в современной микроэлектронике для создания высокопрочных теплоотводящих элементов. Одним из перспективных направлений является создание спеченных при воздействии высоких давлений и температур алмазных поликристаллов, в том числе алмазных наноразмерных порошков, например детонационного наноалмаза [1].

Детонационный наноалмаз представляет собой сложную систему, включающую нанокристаллическое алмазное ядро и примесную подсистему из различных примесных элементов и соединений. Количественный и элементный состав примесной оболочки зависит от технологических условий синтеза. Но, как показывают эксперименты, примеси являются неотъемлемой составляющей алмазных наночастиц [2].

В настоящем исследовании был использован порошок детонационного наноалмаза, изготовленный ФНПЦ «Алтай» по ТУ 84-112-87. Термобарическое спекание наноалмазов осуществлялось на беспрессовом аппарате «Разрезная сфера» (БАРС) [3] в Институте геологии и минералогии СО РАН. Спекание проводилось при давлении 5 ГПа и температурах 1100 и 1200 °С. Время термобарического воздействия при достижении максимальных параметров спекания составляло 60 с. Исследование твердости проводилось на микротвердомере ПМТ-3. Измерение теплопроводности образцов проводилось в режиме монотонного нагрева методом динамического калориметра на измерителе теплопроводности ИТ-λ-400 в интервале температур 7–5275 °С.

Обобщенные данные исследований значений микротвердости образцов лежат в широком диапазоне. Для образца, спеченного при температуре 1100 °С, минимальное значение твердости составляет 4 ГПа, максимальное – 14,3 ГПа, для образца спеченного при 1200 °С – 3,2 и 14 ГПа соответственно. Разброс данных обусловлен не ошибкой измерения, а неоднородностью микроструктуры спеченных образцов. Можно выделить области с высокой твердостью, которые расположены в центральной части образцов. Также можно выделить области с низкой прочностью, расположенные преимущественно по периферии. Неоднородность структуры спеченных наноалмазных материалов означает, что процесс консолидации нанокристаллов алмазов в поликристаллический агрегат в объеме материала при спекании протекает неравномерно.

На рисунке представлены данные зависимости теплопроводности спеченных наноалмазных образцов от температуры нагрева.



Зависимость теплопроводности спеченных образцов от температуры

Как видно из данных рисунка, теплопроводность образцов, полученных при таких термобарических параметрах спекания, очень низка. Значение теплопроводности образцов в температурном интервале измерений практически остается постоянной. Наблюдается незначительное увеличение теплопроводности при повышении температуры спекания наноалмазов. Так, среднее значение теплопроводности образца, спеченного при температуре 1100 °C составляет 15 Вт/(м·К), а у спеченного при температуре 1200 °C – 21 Вт/(м·К).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что спекание детонационных наноалмазов при высоком давлении и температуре приводит к формированию прочных композиционных материалов. Однако полученные образцы имеют низкие теплопроводящие свойства, что не противоречит известным литературным данным [4].

Литература

1. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П. А. Витязь и др. / под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – С. 381.
2. The structure of detonation nanodiamond particles / V. A. Plotnikov, S. V. Makarov, D. G. Bogdanov, A. S. Bogdanov // AIP Conf. Proc. – 2016. – Vol. 1785. – P. 040045-1–040045-4.
3. Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования / А. И. Чепуров, И. И. Федоров, В. М. Сонин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. – 196 с.
4. Kidalov S. V., Shakhov F. M., Vul A. Ya. Thermal conductivity of sintered nanodiamonds and microdiamonds // Diamond & Related Materials. – 2008. – No. 17. – P. 844–847.

СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАБОТАННЫХ ДОРНОВАНИЕМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАСТИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Бознак А.О.^{1,2}, Арляпов А.Ю.¹, Дмитриев А.И.²

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
30, пр. Ленина, Томск, 634050, Российская Федерация

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского отделения Российской академии наук,
2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: boznakao@gmail.com

Применение дорнования для обработки отверстий в толстостенных цилиндрах позволяет обеспечить их высокую точность, низкую шероховатость их поверхности, а также значительно упрочнить поверхностный слой [1–2]. Вместе с тем обработка дорнованием сопровождается формированием в обрабатываемых цилиндрах значительных остаточных напряжений [1–4]. При последующей механической обработке наружной поверхности или отверстия цилиндров происходит удаление слоев материала с остаточными напряжениями, что ведет к их перераспределению и как следствие к деформации и снижению точности их размеров. Значительный интерес представляет поиск технологических путей снижения этих напряжений.

Анализ литературы показал, что одним из таких методов может быть применение осевого пластического растяжения цилиндров с малыми (1...2 %) деформациями, осуществляемое после дорнования [5]. Моделирование методом конечных элементов в программном комплексе ABAQUS показало потенциальную высокую эффективность предлагаемого метода, которая в последствии была подтверждена при экспериментальном исследовании, выполненном на образцах типа толстостенных цилиндров из стали 20.

Уже при растяжении со степенью деформации 0,5 % окружные остаточные напряжения снижались в 3,2 раза, а радиальные – в 2,9 раза. Однако пластическое растяжение приводило к падению точности отверстий: при растяжении со степенью деформации 0,5 % – на 1 квалитет, а со степенью деформации 1,5 % – на 2 квалитета.

Таким образом, было установлено, что наиболее рационально применять дорнование в сочетании с осевым пластическим растяжением со степенью деформации не более 0,5%, так как дальнейшее увеличение деформации не приводит к значительному снижению уровня остаточных напряжений, однако вызывает существенное падение точности отверстий достигнутой при обработке дорнованием.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0186, идентификатор проекта RFMEFI60717X0186).

Литература

1. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – М.: МАШГИЗ, 1961. – 192 с.
2. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наук. думка, 1990. – 320 с.
3. Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2010. – 171 с.
4. Монченко В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров. – М.: Машиностроение, 1980. – 248 с.
5. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.

EFFECT OF BROMINATED UHMWPE ON THE PROPERTIES AND STRUCTURE OF RESULTING UHMWPE-BASED BORON CARBIDE NANOCOMPOSITES

Borisova R.V., Nikiforov L.A., Okhlopkova T.A., Spiridonov A.M.,
Okhlopkova A.A., Koryakina N.S.

*M. K. Ammosov North-Eastern Federal University,
58, Belinskogo St., Yakutsk, 677000, Russian Federation,
e-mail: rv.borisova@s-vfu.ru, la.nikiforov@s-vfu.ru*

The tendency of nanoparticles to agglomerate with each other and insufficient interaction of nanoparticles with a polymer are the main reasons impeding the complete disclosure of the potential of nanoparticles as polymer modifiers [1]. Previously, a technology of liquid-phase compounding of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) with inorganic nanoparticles under ultrasonic vibrations aimed at obtaining the uniform distribution of nanoparticles in a polymer was developed, as well as a technology of UHMWPE bromination intended for creating an agent affecting the interphase interaction of nanoparticles and a UHMWPE matrix [2, 3]. In this paper, the development of a polymer nanocomposite (PNC) based on UHMWPE and boron carbide nanoparticles with the application of previously developed techniques is described.

The results of tribological testing of composites with B-UHMWPE have shown a 5 times increase in wear resistance in comparison with a PNC without B-UHMWPE. Even the addition of a small amount of B-UHMWPE changes the properties considerably. A PNC with 2 wt % of B-UHMWPE is characterized by a 22 % decrease in tensile strength in comparison with the composite without B-UHMWPE. The compressive strength and hardness of the PNC also decreases.

All the changes in properties can be explained by changes in interphase interactions. It is known that the boundary layer between the filler and the polymer is a critical factor for polymer composite strength [1] and for the friction and wear mechanisms [5]. Thus, B-UHMWPE affects as an agent changing the interphase interaction. The same results were obtained earlier in [3]. However, the results of this paper cannot be explained by an increase in the adhesion of nanoparticles to UHMWPE. Therefore, the choice of modifier for the polymer matrix should be made in view of the features of the filler and the polymer surfaces. The best way to reveal the whole potential of nanoparticles as a filler is the use of components with surfaces complementary to each other.

References

1. Pukánszky, B. Influence of interface interaction on the ultimate tensile properties of polymer composites // *Composites*. – 1990. – 3(21). – pp. 255–262.
2. Okhlopkova, T.A. et al. Technology of liquid-phase compounding of ultra-high-molecular-weight polyethylene with nanoparticles of inorganic compounds under the action of ultrasonic vibrations / T.A. Okhlopkova, R.V. Borisova, L.A. Nikiforov, A.M. Spiridonov, P.P. Sharin, A.A. Okhlopkova // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2016. – Vol. – 89. – Iss. 9. – pp. 1469–1476.
3. Borisova, R.V. et al. Bromination of UHMWPE surface as a method of changing adhesion to nanoparticles / R.V. Borisova, A.M. Spiridonov, T.A. Okhlopkova, L.A. Nikiforov, A.N. Golikov, N.V. Shadrinov, A.A. Okhlopkova // *Materials Today Communications*. – 2018. – 14. – pp. 65–71.
4. Pukánszky, B. Influence of interface interaction on the ultimate tensile properties of polymer composites // *Composites*. – 1990. – 3(21). – pp. 255–262.
5. Friction and Wear of Polymer Composites: Composite Materials Series Vol. 1 / ed. Klaus Friedrich. Amsterdam: – Elsevier, 2012. – 478 p.

ПОЛУЧЕНИЕ РЕЦЕПТУРЫ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ СВМПЭ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Панин С.В., Гришаева Н.Ю., Люкшин П.А., Люкшин Б.А., Панов И.Л.,
Бочкарева С.А., Матолыгина Н.Ю., Алексенко В.О.,

*ИФПМ СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: svp@ispms.tsc.ru*

Возможным способом создания композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), имеющих более высокие технологические свойства и повышенное сопротивление изнашиванию при сухом трении скольжения, является введение частиц стекловолокна совместно с полиэтиленом низкого давления, привитым малеиновым ангидритом (HDPE-g-CMA). Выбор подобных «процессинговых» наполнителей для введения в неполярную сверхвысокомолекулярную матрицу связан с необходимостью обеспечения адгезии между полимерными компонентами смеси. Проблема заключается в определении необходимой при этом степени наполнения.

Предлагается подход к определению управляющих параметров (фазовый состав, свойства фаз), придающих материалу заданные эффективные свойства или попадание их в заранее заданные интервалы [1, 2]. В соответствии с этим подходом на основе анализа экспериментальных и (или) теоретических данных, содержащих информацию об эффективных характеристиках в зависимости от значений управляющих параметров, в пространстве состояний строятся соответствующие поверхности отклика физико-механических характеристик на значения управляющих параметров.

Опорные точки, служащие для нахождения требуемых параметров, в работе получены на основе физических экспериментов. После получения ряда опорных точек используется метод дополнения данных до регулярного массива с применением линейной интерполяции, а далее для построения непрерывной функции двух переменных используется интерполяционный полином Лагранжа.

В итоге получают зависимости эффективных характеристик (износа, модуля упругости и относительного удлинения) в виде непрерывных функций, по которым можно построить регулярные массивы, отражающие зависимости этих характеристик от управляющих параметров. Управляющими параметрами служат степени наполнения малеиновым ангидритом HDPE-g-CMA и стекловолокном. Чтобы найти управляющие параметры, придающие требуемые значения эффективных характеристик (в виде односторонних ограничений, приведенных выше), нужно наложить полученные графики друг на друга.

В итоге получена область значений управляющих параметров, обеспечивающих соответствие всех эффективных свойств композиции заданным ограничениям.

Работа выполнена в рамках проекта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» (Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI60417X0154).

Литература

1. S.A. Bockkareva, N.Yu. Grishaeva, B.A. Lyukshin, P.A. Lyukshin, N.Yu. Matolygina, I.L. Panov Obtaining of specified effective mechanical, thermal, and electrical characteristics of composite filled with dispersive materials // [Inorganic Materials: Applied Research](#), 2017, Vol. 8, Issue 5, pp. 651–661
2. Anochina N.Yu., Matolygina N.Yu., Lyukshin B.A., Lyukshin P.A. Computer designing filled polymer composition with the requisite deformation-strength properties // *Mechanics of composite materials and structures*. – 2009. – Т. 15. – No. 4. – С. 600–609.

МЕЖФАЗНЫЙ СЛОЙ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ НАПОЛНЕННОГО ЭПОКСИДНОГО КОМПОЗИТА

Брусенцева Т.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича» СО РАН,
4/1, ул. Институтская, Новосибирск, 630090, Российская Федерация,
e-mail: Brusentseva@itam.nsc.ru

Полимерные материалы на основе эпоксидных смол обладают таким комплексом свойств (адгезионных, механических, электрических и т. д.), которые во многих случаях делают их незаменимыми при использовании в промышленности. При этом недостаточно высокие вязкоупругие свойства полимерных матриц не позволяют во многих случаях полностью реализовать прочность армирующих материалов в композите. Известно, что для повышения свойств гетерогенных материалов на эпоксидной основе используются добавки неорганических наноразмерных частиц различной природы. Гетерогенный материал необходимо рассматривать как состоящий из трех фаз, т. е. матрицы, наполнителя и межфазный слой, который окружает каждое из включений. Существование межфазного слоя было доказано с использованием различных экспериментальных методик, однако определение его упругих свойств встречает очевидные затруднения.

Цель работы – определение механических характеристик гетерогенного материала на основе эпоксидной смолы и нанонаполнителей с учетом характеристик межфазного слоя.

В работе рассмотрена система, состоящая из сферической наночастицы, на поверхности которой образуется межфазный слой, в результате взаимодействия матрицы, наполнителя и химических элементов, адсорбированных из некоторого объема матрицы. Используя уравнение для свободной энергии, получили формулу для вычисления толщины межфазного слоя, которая зависит от температуры стеклования и поверхностного натяжения. Обобщена математическая модель Фойгта и установлена зависимость модуля упругости гетерогенного материала от концентрации наполнителя с учетом характеристик межфазного слоя.

Проведена серия экспериментальных исследований и получены зависимости модуля упругости композита от концентрации наполнителя. Механические характеристики исследованы в режиме трехточечного изгиба по стандарту испытаний *ASTM D 790*. В качестве матрицы использована эпоксидангидридная композиция на основе смолы DER-330. Наполнителем служил гидрофильный порошок оксида кремния А-380 – Аэросил, среднечисленный размер 7 нм.

Расчеты, проведенные с использованием математической модели, показали, что для данного композиционного материала толщина межфазного слоя равна $2,76 \times 10^{-7}$ м.

Эффект усиления композиционного материала на основе Der-330 и порошка А-380 зависит от характеристик межфазного слоя, которые определяются концентрацией наполнителя. Модуль упругости межфазного слоя растет до 1,2 % объемной концентрации А-380, а затем с увеличением концентрации наполнителя модуль падает. Падение можно объяснить тем, что при росте концентрации наполнитель склонен образовывать агломераты, вокруг которых межфазный слой уже не образуется. Таким образом, для исследуемого полимерного композиционного материала усиливающее воздействие наполнителя будет наблюдаться при концентрации 1,2 %.

Выводы

Рассмотрена трехслойная модель гетерогенного материала, включающая в себя матрицу, наполнитель и межфазный слой. Получено аналитическое выражение для свободной энергии образования межфазного слоя около наночастицы. Установлена теоретическая зависимость механических свойств гетерогенного материала от концентрации наполнителя с учетом характеристик межфазного слоя. Результаты показали, что с по-

мощью полученных уравнений можно определить модуль упругости межфазного слоя, зная модуль упругости гетерогенного материала. Показано, что в зависимости от свойств и концентрации наполнителя в связующем определяется и степень влияния на прочностные характеристики межфазного слоя. На базе серии экспериментальных данных для композиционного материала на основе эпоксидной смолы DER-330 и нанопорошка диоксида кремния А-380 получено значение модуля упругости межфазного слоя и его толщины в зависимости от концентрации наполнителя.

ВЛИЯНИЕ НАНОПОРОШКОВЫХ ИНОКУЛЯТОРОВ НА ДЕФОРМАЦИЮ СПЛОШНОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАПЛИ ПОСЛЕ ЕЕ СОУДАРЕНИЯ С ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Бублик В.В., Черепанов А.Н.

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
д. 4/1, ул. Институтская, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация,
e-mail: bublik@itam.nsc.ru*

Развитие современного машиностроения требует создания новых конструкционных материалов, которые были бы не только коррозионностойкими и прочными, но при этом легкими и обладали бы достаточной пластичностью. К такому типу материалов можно отнести пористые металлы. Благодаря высокой удельной прочности пористые металлы представляют значительный интерес в производстве прочных облегченных деталей для авиационной и ракетно-космической техники. В связи с тем, что часто такие детали работают в агрессивной среде, обычно требуется покрытие рабочих поверхностей различными материалами, стойкими к коррозии, химическим и другим агрессивным воздействиям. Один из способов нанесения таких покрытий – газодинамическое или плазменное напыление. В этой связи исследованию процессов соударения капли с подложкой уделяется большое внимание.

В работе исследуется задача взаимодействия жидкометаллической капли с пористой подложкой, представляющая, на наш взгляд, интерес с точки зрения повышения прочности сцепления с подложкой, а также для вопросов динамической пропитки рабочих поверхностей различными материалами, стойкими к коррозии, химическим и другим агрессивным воздействиям. Предложенная модель учитывает капиллярные и адгезионные свойства расплава. В работе на основе этой модели проведены численные расчеты по влиянию концентрации нанопорошковых инокуляторов на геометрические размеры формирующегося сплэта (застывшей жидкой частицы) и глубину проникновения жидкости в подложку.

Проведены численные расчеты для модельного случая соударения сплошной жидкой капли расплава диоксида циркония с пористой подложкой, которые показывают, что в этом случае геометрические размеры сплэта и глубина проникновения жидкости в подложку изменяются не более чем на 2–3 %. Этот результат можно считать почти точным, укладывающимся в пределы погрешностей исходной модели, т. е. добавка небольшого количества тугоплавких наночастиц практически не влияет на геометрические размеры итогового сплэта. Это объясняется тем, что после соударения капля успевает деформироваться к почти конечной своей форме при температурах выше температуры затвердевания, а сам процесс кристаллизации начинается, когда движение капли почти совсем затормозилось.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00571.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЛЬСАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАЗРУШАЮЩИХ И НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ

Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
д. 7, ул. Студенческая, г. Ижевск, Российская Федерация,
e-mail: ludmila396@rambler.ru*

Появление остаточных напряжений в рельсах при производстве связано с изменением температуры металла в процессе термической обработки, горячей деформацией при прокате и, как следствие, изменением микроструктуры стали. Остаточные напряжения значительно влияют на срок службы рельса. В то время как остаточные напряжения растяжения уменьшают усталостную долговечность металла и могут привести к преждевременному развитию недопустимых дефектов, остаточные напряжения сжатия увеличивает срок появления и развития трещин. Для предотвращения ускоренного развития усталостных дефектов целесообразно измерять остаточные напряжения в рельсах при приемочном контроле на заводах-изготовителях.

Проведены исследования уровня остаточных напряжений в десяти длинномерных (100 м) рельсах типа Р65 трех плавков с использованием разрушающего метода (расхождение паза согласно ГОСТ Р 51685-2013) и неразрушающего ультразвукового метода.

Измерение ультразвуковым методом осуществлялось с использованием структуроскопа СЭМА на расстоянии 2 и 3 м с одного и другого торцов рельса. Напряженное состояние рассчитывается структуроскопом по скорости распространения сдвиговых волн, поляризованных в ортогональных направлениях. Исследования производились при установке преобразователя со стороны поверхности катания рельса (акустическая ось направлена по высоте рельса) и со стороны шейки (акустическая ось направлена по горизонтали). Значения остаточных напряжений при измерении со стороны поверхности катания изменялись от 30 до 65 МПа, а со стороны шейки от –240 до –75 МПа.

Далее образцы были исследованы разрушающим методом. Остаточные напряжения были оценены после надреза шейки по величине расхождения полученного паза (согласно ГОСТ Р 51685), значения которого изменялось от 1,1 до 1,7 мм.

Коэффициент корреляции остаточных напряжений измеренных методом расхождения паза и структуроскопом СЭМА со стороны поверхности катания составил 0,75, а со стороны шейки – 0,3. Низкий коэффициент корреляции при измерении со стороны шейки рельса связан с малой базой прозвучивания при оценке напряжений по скоростям поперечных волн.

Различия в напряженных состояниях одной и той же партии рельсов связаны с неоднородностью структуры металла, которая изменяется в результате различий в скорости охлаждения разных рельсов в процессе термической обработки.

Таким образом, изменения структурного состояния могут приводить к погрешности измерения остаточных напряжений в рельсах. Известно, что структурное состояние металла влияет на скорость распространения рэлеевской волны. Измерение скорости рэлеевской волны производилось с прибором ИСАВ-1, принцип работы которого основан на автокорреляции принятых импульсов. В результате подтверждены различия в структуре металла в разных плавках: скорость рэлеевской волны изменяется от 3000 м/с до 3100 м/с.

Стоит отметить, что на поверхности рельсов после полного производственного цикла остается слой окалины. Для повышения точности измерений скорости распространения рэлеевской и, следовательно, достоверности оценки влияния структуры, на изменение напряженного состояния измеренного структуроскопом СЭМА требуется дополнительная оценка поверхности.

Полученная корреляционная связь между разрушающим и ультразвуковым неразрушающим методами оценки напряженного состояния рельсов дает основание полагать о возможности разработки соответствующей методики контроля. Однако для повышения достоверности необходимо также учитывать изменение структурного состояния металла в процессе неравномерного охлаждения металла в разных рельсах.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № 14.Z56.18.6599-МК

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СДВИГОВОЙ КОНВЕКЦИИ МАРАНГони ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Бурмашева Н.В.^{1,2}, Просвиряков Е.Ю.¹

¹Институт машиноведения УрО РАН,

34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, Российская Федерация,

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,

19, ул. Мира, Екатеринбург, Российская Федерация,

e-mail: nat_burm@mail.ru, evgen_pros@mail.ru

При исследовании конвективных движений слоя вязкой несжимаемой жидкости, одна граница которого является свободной поверхностью, при заданных на свободной границе давлении, равном атмосферному давлению, и неоднородных тепловых источниках на движение жидкости оказывают существенное влияние зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры и порождаемый ею термокапиллярный эффект.

В докладе рассматривается новое точное решение переопределенной системы уравнений Обербека–Буссинеска, которое описывает стационарное сдвиговое течение вязкой несжимаемой жидкости в бесконечном слое при учете термокапиллярного эффекта на одной из границ слоя. В предложенном решении одна горизонтальная скорость зависит только от поперечной координаты, а вторая – еще и от одной из горизонтальных координат. Показано, что в случае термокапиллярной конвекции градиент компоненты скорости вдоль продольной координаты, входящей в ее состав, есть постоянная функция. Поле температуры и поле давления являются трехмерными. Выбранный класс решений позволяет моделировать поведение вертикально завихренных жидкостей и учитывать нелинейные эффекты в движущейся жидкости (за счет сохранения конвективной производной в уравнении теплопроводности).

Основное внимание в докладе уделено исследованию поля давления, описываемого многочленами трех переменных. Обсуждаются особенности профиля давления. При помощи использованных при анализе алгебраических методов показано, что фоновое давление есть немонотонная функция и что поле давления может расслаиваться на несколько зон относительно отсчетного значения (атмосферного давления). Приведены примеры ситуаций, иллюстрирующих стратификацию поля давления.

Работа выполнена при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа УМНИК), договор № 12281ГУ/2017.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ДЛЯ СЛОИСТОЙ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Бурмашева Н.В.^{1,2}, Просвиряков Е.Ю.¹

¹Институт машиноведения УрО РАН,

34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, Российская Федерация,

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,

19, ул. Мира, Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: nat_burm@mail.ru, evgen_pros@mail.ru

Одним из актуальных вопросов подземной гидромеханики является определение числа и положения так называемых точек равновесия, в которых температурное поле, концентрационное поле, поле давления, поле скорости или любое другое исследуемое в гидродинамике поле обращается в ноль. В окрестностях таких точек могут образовываться застойные области. Необходимость учета застойных зон возникает в виду того, что в окрестности критической точки меняются характеристики потока.

В работе рассматривается задача учета термокапиллярного эффекта на одной из границ слоя вязкой несжимаемой жидкости при исследовании крупномасштабных конвективных движений. В классе, моделирующем поведение вертикально завихренной жидкости при отсутствии внешнего заданного вращения, было получено точное решение. Для данного класса не выполняется условие прилипания на нижней границе слоя. Кроме того, структура выбранного класса решений позволила сохранить адвективную производную в уравнении теплопроводности, что привело к возможности моделирования расслоений полей температуры и давления.

Получено точное решение, проведен анализ температурного поля, сделаны оценки на возможное число критических точек поля температур, приведены примеры ситуаций, отвечающих разному числу точек расслоения.

Работа выполнена при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа УМНИК), договор № 12281ГУ/2017.

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СТАЛЕЙ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПОСЛЕ 50-ТИЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Бурнашев А.В., Большаков А.М.

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
Якутск, 677891, Российская Федерация
e-mail: a.v.burnachev@mail.ru*

Исследование поведения материала магистральных газопроводов в процессе длительной эксплуатации в условиях низких климатических температур, является актуальной задачей по обеспечению техногенной безопасности. Основная идея таких исследований заключается в оценке технического состояния и выработке прогнозов для дальнейшей безопасной эксплуатации сложных технических систем.

На территории Якутии с 70-х гг. эксплуатируется магистральный газопровод Матах–Берге–Якутск, обеспечивающий г. Якутск и близлежащие районы природным газом. Газопровод выполнен подземно-надземным способом, с множеством переходов через ручьи. За время эксплуатации около 50 лет произошло множество аварий разного вида. Из многочисленных наблюдений отказов и аварий сложных технических систем на Севере известно, что при длительной эксплуатации, значительно ухудшаются механические свойства сталей, снижается пластичность, падает значение ударной вязкости, трещиностойкости.

Так как газопровод эксплуатируется в низких климатических температурах, а основным показателем хладостойкости материала является ударная вязкость, была поставлена цель – исследовать изменение ударной вязкости и оценить ресурс стали магистрального газопровода после длительной эксплуатации в условиях криолитозоны.

Получены уникальные результаты KCV и KCU после столь продолжительного времени эксплуатации. Проведена сравнительная оценка значений ударной вязкости труб одной партии после 50-летней эксплуатации и аварийного запаса.

Определена роль образцов с острым надрезом как более информативного показателя признаков деградации механических свойств и сопротивления к хрупкому разрушению.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ОТКАЗОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Буслаева И.И.¹, Яковлева С.П.^{1,2}

¹Якутский научный центр СО РАН,

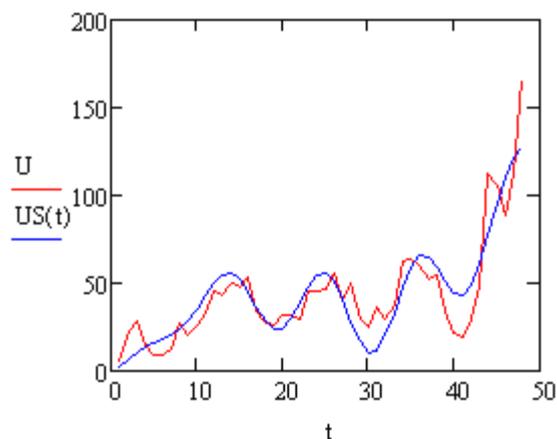
2, Петровского, Якутск, 677980, Российская Федерация,

²Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,

1, ул. Октябрьская, Якутск, 677980, Российская Федерация,

e-mail: buslajeva@mail.ru, spyakovleva@yandex.ru

Для прогнозирования остаточного ресурса машин и конструкций необходимы исследования работоспособности и отказов их элементов при фактических нагрузочных воздействиях, характерных для конкретных условий эксплуатации. В связи с разнообразием конструктивных параметров машин и температурно-нагрузочных условий требуется более общий подход к оценке работоспособности технических объектов. Поэтому разработка математической модели на основе временных рядов отказов, возникающих в условиях реальной эксплуатации, имеет большое значение для оценки надежности техники и прогнозирования ресурса в условиях недостаточности информации. Цель работы – разработка универсальной методики обработки временных рядов экспериментальных данных с выявлением их ритмологической структуры. Для обработки временных рядов отказов техники на Севере применяется косинор-анализ с трендом: временной ряд отказов методом наименьших квадратов аппроксимируется одной гармоникой, обусловленной климатическими условиями, и основным трендом, связанным со сроком эксплуатации. Для выявления нескольких скрытых периодичностей и трендов работоспособности техники, связанных с другими эксплуатационными факторами, разработана универсальная методика, определяющая несколько гармоник и трендов временного ряда отказов на основе последовательного применения косинор-анализа. Аддитивная модель в виде суммы периодических функций более точно аппроксимирует ряд отказов технических объектов, что увеличивает точность прогноза ресурса. Реализация методики в виде программы в математическом пакете MathCad позволяет исследовать ритмологическую структуру работоспособности техники, оценить степень влияния внешних факторов на надежность систем и подсистем технических объектов. Пример применения программы представлен на рисунке: показаны хронограмма отказов электрооборудования автомобилей КАМАЗ за 48 месяцев эксплуатации в климатических условиях криолитозоны и график аддитивной модели. Степень достоверности аппроксимации при наличии трех скрытых периодичностей 60, 12 и 10 месяцев составляет 0,789.



Моделирование работоспособности электрооборудования автомобиля КАМАЗ

Выводы

Предложена универсальная методика обработки временных рядов экспериментальных данных, выявляющая ритмологические особенности различных процессов и явлений, в частности работоспособности технических объектов, связанные с природно-климатическими и эксплуатационными факторами.

Ишков А. М. Математическая ритмология в работоспособности техники на Севере. – Якутск : ЯНЦ СО РАН, 2000. – 320 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ В ФОРМИРОВАНИИ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСТРУДИРУЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОЙ МАТРИЦЫ

Панин С.В.^{1,2}, Корниенко Л.А.¹, Буслович Д.Г.^{1,2},
Донцов Ю.В.², Иванова Л.Р.¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, Академический пр., г. Томск, 634055, Российская Федерация,
²Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,
30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: svp@ispms.tsc.ru, dgb2@tpu.ru

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) является перспективным конструкционным материалом, применяемым для производства антифрикционных изделий различной формы. Однако из-за большой длины полимерных цепей СВМПЭ имеет низкий показатель текучести расплава (ПТР – 0,06 г/10 мин), что не позволяет перерабатывать его традиционными для конструкционных пластиков методами (литье под давлением, шнековая экструзия и др.). В последнее время активно проводятся исследования по использованию методов 3D-печати для изготовления изделий из СВМПЭ. С целью разработки экструдируемых композитов для применения в 3D-технологиях получения деталей узлов трения сложной формы в машиностроении и медицине разрабатывают полимер-полимерные композиции на основе СВМПЭ. В качестве пластифицирующих наполнителей могут выступать: I – привитый полиэтилен высокой плотности (HDPE-g-VTMS); II – блок-сополимер полипропилена с линейным полиэтиленом низкой плотности (PP-b-LLDPE); III – сшитый полиэтилен (PEX-b) и др. С использованием таких пластифицированных матриц далее можно формировать изделия с кратным увеличением износостойкости и приемлемой текучестью расплава. При этом вопросы о роли формирующейся надмолекулярной структуры остаются недостаточно изученными. В работе исследовали полимер-полимерные композиции на основе СВМПЭ, наполненного промышленно выпускаемыми полимерами: HDPE-g-VTMS, PP-b-LLDPE, PEX-b. Образцы изготавливали горячим прессованием двухкомпонентных смесей: I – по порошковой технологии и II – из гранул, полученных из продуктов смешения полимерных компонентов в двухшнековом экструдере. Задача исследования – оценить влияние способа и режимов изготовления на формирование структуры и определяемые ей механические и триботехнические свойства.

В работе использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) фирмы Ticona (GUR-2122) молекулярной массой 4,0 млн и размером порошка 5–15 мкм, порошки (помолотый гранулят) сшитого полиэтилена PEX-b, полипропилена PP-b-LLDPE (размер порошка ~100–200 мкм), привитого полиэтилена высокой плотности HDPE-g-VTMS (размер порошка 100–300 мкм). Гранулы СВМПЭ (размер 3–5 мм). Образцы полимерных композитов получали компрессионным спеканием при давлении 10 МПа и температуре 200 °С со скоростью последующего охлаждения 5 °С/мин.

Показано, что при указанных методах изготовления экструдируемых композитов на основе СВМПЭ прочностные характеристики и износостойкость при умеренных скорости (0,3 м/с) и нагрузке (60Н) незначительно различаются. Надмолекулярная (сферолитная) структура играет определяющую роль в формировании триботехнических характеристик.

Работа выполнена в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» Министерства образования и науки РФ; Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154.

СОЗДАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕКСТИЛЬНОЙ ОСНОВЕ С ЛИТЬЕВЫМ ПОЛИУРЕТАНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Бутусова Е.Н., Якимов А.К.

ООО СК «АЭРОХОД», д. 37Е, ул. Щербакова, Н. Новгород, 603003, Российская Федерация,
e-mail: Anelka13@yandex.ru

На сегодняшний день одним из наиболее быстрых и рациональных путей решения социальных транспортных задач на труднодоступных территориях России представляется использование амфибийных судов на воздушной подушке (АСВП). Такие суда позволяют круглогодично реализовать широкий круг задач по транспортировке грузов и пассажиров, выполнению патрульных и спасательных операций. Огромным экономическим преимуществом АСВП перед другими видами транспорта является отсутствие необходимости значимых вложений в инфраструктуру: для их эксплуатации не требуется создание причальных сооружений, обустроенных фарватеров и дорог, взлетно-посадочных полос и др.

Важной и ответственной системой таких судов является гибкое ограждение (ГО) воздушной подушки, решающее задачу формирования области повышенного давления под корпусом судна.

Гибкое ограждение воздушной подушки АСВП в значительной степени определяет эксплуатационные качества судна: обеспечивает характеристики ходкости, проходимости, мореходности, безопасности эксплуатации как на воде, так и на других типах поверхности. Оно должно быть устойчиво к воздействию внешних факторов, таких как ультрафиолетовое излучение, долгое пребывание в пресной и морской воде, устойчивость к абразивному износу и стойкость к внешним нагрузкам, действующим во время эксплуатации. Кроме того, к ГО предъявляются высокие требования по весовым характеристикам, ресурсу, ремонтпригодности, в том числе и в походных условиях, что в значительной степени определяет производственную и эксплуатационную стоимость АСВП. При круглогодичной эксплуатации амфибийных судов на воздушной подушке работоспособность всех систем, в том числе и системы гибкого ограждения, должна обеспечиваться в широком диапазоне температур (от -40 до $+50$ °С).

Существующие материалы для производства ГО не всегда отвечают требованиям по прочности, пластичности, износостойкости, ремонтпригодности, особенно при пониженных температурах, что ограничивает возможности их использования. Имеющиеся материалы хорошо зарекомендовали себя при производстве амфибийных катеров грузоподъемностью до 2,5 т. Однако увеличение масштабов грузо- и пассажироперевозок требует более высоких значений физико-механических характеристик в диапазоне температур от -40 до $+50$ °С. В связи с этим возникает необходимость создания материалов, способных обеспечивать безопасную круглогодичную эксплуатацию амфибийных катеров в широком диапазоне грузоподъемности.

Исходя из расчетных нагрузок, приходящихся на изделия и элементы ГО при производстве АСВП пассажироместимостью до 50 чел. (5 т полезного груза), в качестве армирующей тканевой основы выбраны равнопрочные по основе и утка полиамидные (капроновые) текстильные ткани для гибких ограждений марок ТК-160-р-1 и ТК-270-р, согласно ГОСТ 23114-78. Данные типы тканей выпускаются шириной до 1,7 м. Защитные свойства обеспечиваются трехкомпонентным полиуретановым эластомером Hyperlast 152, позволяющим менять твердость готового покрытия в процессе изготовления.

Изготовление материала для элементов ГО разворачиваемой плоской формы происходило наливом защитного покрытия на основу. Данная технология позволяет создавать материал с защитным покрытием как равномерным по толщине, так и с местным утолщением для обеспечения износостойкости в местах повышенного абразивного износа. Налив полиуретанового покрытия на текстильную основу проводился двумя способами: с ручным и автоматическим распределением эластомера по основе.

Были изготовлены образцы материалов с однослойным и двухслойным покрытиями. На полученных композиционных материалах проведены исследования физико-механических характеристик.

Результаты исследований разработанных полиуретано-тканевых материалов сопоставлены с серийно выпускаемыми резинотканевыми материалами (РТМ) для гибких ограждений производства АО «Ярославль–Резинотехника» и зарубежными аналогами. Анализ показал, что прочностные характеристики опытных материалов при комнатной температуре не уступают РТМ, предназначенных для гибких ограждений.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ О ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ С ТРАНСВЕРСАЛЬНО-МЯГКИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Бадриев И.Б.¹, Буянов В.Ю.¹, Макаров М.В.^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
18, ул. Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,

²Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева,
10, ул. К.Маркса, Казань, 420111, Российская Федерация,
e-mail: ildar.Badriev1@mail.ru, makarovmaksim@mail.ru, ovsanka@ro.ru

Трехслойные конструкции широко применяются в различных отраслях промышленности. Трехслойная конструкция представляет собой систему, которая состоит из двух внешних сравнительно тонких слоев и среднего, более толстого слоя. Внешние слои изготавливаются из более прочных материалов (стали, сплавов легких материалов, дерева, пластмасс и др.). Внутренний слой – наполнитель – изготавливают из относительно малопрочных материалов с малой плотностью (из пробки, резины, древесины, пластмассы, вспененного полимерного материала, а также из легкого металла в форме сот, перемычек, гофрировки или другой конструкции). Несущие слои воспринимают продольные нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг) в своей плоскости и поперечные изгибающие моменты. Наполнитель воспринимает поперечные силы при изгибе и обеспечивает совместную работу и устойчивость несущих слоев. Способность наполнителя воспринимать нагрузку в плоскости несущих слоев зависит от конструкции наполнителя и его жесткостных характеристик [1–3]. В настоящей работе рассматриваются одномерные геометрические нелинейные задачи о смешанных формах потери устойчивости (ФПУ) несущих слоев трехслойной пластины с трансверсально-мягким наполнителем, находящейся в условиях торцевого сжатия силой, приложенной к одному из внешних слоев, и поперечной распределенной нагрузке. Обобщенная постановка сформулирована в виде операторного уравнения в пространстве Соболева. При таком нагружении пластина оказывается в условиях продольно-поперечного изгиба, одной из причин ее разрушения является реализация исследуемых ФПУ [4]. Предполагаем, что края несущих слоев шарнирно оперты на абсолютно жесткие в поперечном направлении диафрагмы. В уточненной постановке задача описывается системой пяти обыкновенных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями [5, 6]. Для решения задачи используется предложенный в [7–9] двухслойный итерационный процесс. Для поиска неустойчивых положений равновесия были найдены точки бифуркаций нелинейных решений. С этой целью предложен метод продолжения по параметру, в качестве которого была выбрана работа внешних сил. Другой способ состоит в линеаризации уравнений в окрестности нелинейного решения и введении в рассмотрение нелинейной задачи на собственные значения. Предложенные методы были реализованы численно с помощью разработанного в среде Matlab комплекса программ.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-01-00301, 17-08-01279, 18-38-00595).

Литература

1. Hwu C., Hu J. S. Buckling and postbuckling of delaminated composite sandwich beams // AIAA Journal. – 1992. – Vol. 30, no. 7. – P. 1901–1909.
2. Badriev I. B., Makarov M. V., Paimushin V. N. Contact statement of mechanical problems of reinforced on a contour sandwich plates with transversally-soft core // Russian Mathematics. – 2017. – Vol. 61, no. 1. – P. 69–75.
3. Badriev I. B., Makarov M. V., Paimushin V. N. Mathematical simulation of nonlinear problem of three-point composite sample bending test // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1056–1062.

4. Паймушин В. Н. Теория устойчивости трехслойных пластин и оболочек (этапы развития, современное состояние и направления дальнейших исследований) // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2001. – № 2. – С. 148–162.
5. Paimushin V. N. Nonlinear theory of the central bending of three-layer shells with defects in the form of sections of bonding failure // Soviet Applied Mechanics. – 1987. – Vol. 23, no. 11. – P. 1038–1043.
6. Макаров М. В., Бадриев И. Б., Паймушин В. Н. Нелинейные задачи о смешанных формах потери устойчивости трехслойных пластин при продольно-поперечном изгибе // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – Т. 20, № 5. – С. 1275–1278.
7. Badriev I. B., Zadvornov O. A., Saddek A. M. Convergence Analysis of Iterative Methods for Some Variational Inequalities with Pseudomonotone Operators // Differential Equations. – 2001. – Vol. 37, no. 7. – P. 934–942.
8. Badriev I. B., Makarov M. V., Paimushin V. N. Longitudinal and transverse bending by a cylindrical shape of the sandwich plate stiffened in the end sections by rigid bodies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 158 (1), art. no. 012011.
9. Badriev I. B., Banderov V. V., Makarov M. V. Mathematical Simulation of the Problem of the Pre-Critical Sandwich Plate Bending in Geometrically Nonlinear One Dimensional Formulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 208 (1), art. no. 012002.

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА И РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ГЛУБИН ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Костин В.Н.^{1,2}, Василенко О.Н.^{1,2}, Бызов А.В.¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
18, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,

e-mail: kostin@imp.uran.ru

При поверхностном упрочнении металлов, как правило, не возникают резкие переходы от материала упрочненного слоя поверхности к материалу сердцевины детали. Область пространства, обозначающая эту границу, называют переходным слоем, образующимся, например, при азотировании, цементации, борировании по причине более быстрого насыщения верхних областей приповерхностного слоя. В то же время, при таком методе упрочнения, как ТВЧ-закалка, практически не образуется переходной зоны в силу равномерного разогрева образца вихревыми токами, имеющими ограниченную глубину проникновения в закаливаемую деталь.

В настоящее время существуют различные методы контроля упрочненных слоев. Наиболее распространенные в мире среди них это ультразвуковые, вихретоковые и феррозондовые, магнитные, электрические методы.

Цель работы – с помощью модельных и натуральных экспериментов показать возможность контроля глубины упрочненных слоев стали при наличии переходного слоя.

При проведении расчетов в программном комплексе ANSYS в качестве расчетной модели электромагнита использовали распространенный типоразмер электромагнита с сечением полюсов 12×28 мм. Объект контроля представлял собой массивную трехслойную (закаленный слой, переходный слой, мягкая сердцевина) пластину 56×300×230 мм. При этом толщина переходного слоя была фиксирована и составляла 2 мм. Упрочненный слой варьировался в пределах 0,5–20 мм. Результаты вычислений представляют собой ряд линейно возрастающих зависимостей тангенциальной компоненты напряженности H_t магнитного поля в образце на глубинах 0; 0,1; 0,2 мм. На рис. 1 представлена зависимость H_t от глубины упрочненного слоя на поверхности пластины.

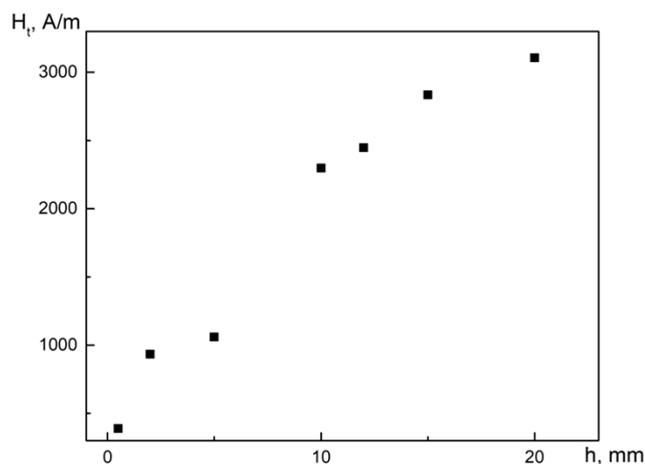


Рис. 1. Зависимость H_t от глубины упрочненного слоя на поверхности пластины

Для проведения измерений таких величин, как напряженность магнитного поля и магнитный поток, применялась аппаратно-программная система DIgital Universal System 1.15-M (АПС DIUS 1.15-M), которая представляет собой персональный компьютер с установленной программой для управления данной системой, преобразователь в виде электро-

магнита с датчиками Холла, с помощью которых измеряются относительные значения магнитных характеристик в мВ.

При размещении закаленных пластин различной толщины из стали 62С2 на магнитомягкой сердцевине из стали 3 проводилось варьирование глубины закаленного слоя от 0 до 14 мм.

С помощью АПС DIUS 1.15-М измерялись относительные значения напряженности магнитного поля H_p при фиксированных значениях магнитного потока Φ_p в магнитопроводе при перемагничивании изделия по нисходящей ветви петли гистерезиса. Значения Φ_p , при которых измерялись H_p , задавались программно. На рис. 2 представлены зависимости относительной величины напряженности магнитного поля на поверхности двуслойного объекта после его перемагничивания по нисходящей ветви петли гистерезиса до фиксированного значения магнитного потока от толщины упрочненного слоя.

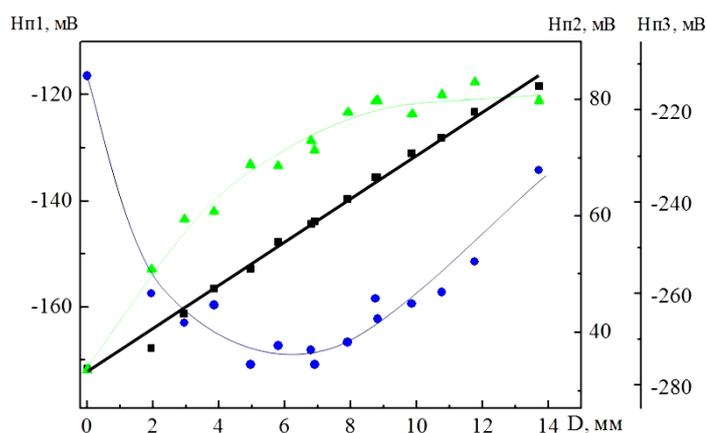


Рис. 2. Зависимости относительной величины напряженности магнитного поля на поверхности двуслойного объекта после его перемагничивания по нисходящей ветви петли гистерезиса до фиксированного значения магнитного потока от толщины упрочненного слоя

На основе результатов пространственного численного моделирования распределения магнитного поля в трехслойном объекте и измерений значений H_p при различных Φ_p было получено, что при значении $\Phi_p = 100$ мВ зависимость напряженности поля H_p от глубины упрочненного слоя h является прямо пропорциональной для всех глубин упрочненного слоя. Что говорит о возможности контроля поверхностного упрочнения при наличии переходных слоев.

Работа выполнена по Проекту Президиума УрО РАН № 18-10-2-8.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОГО ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

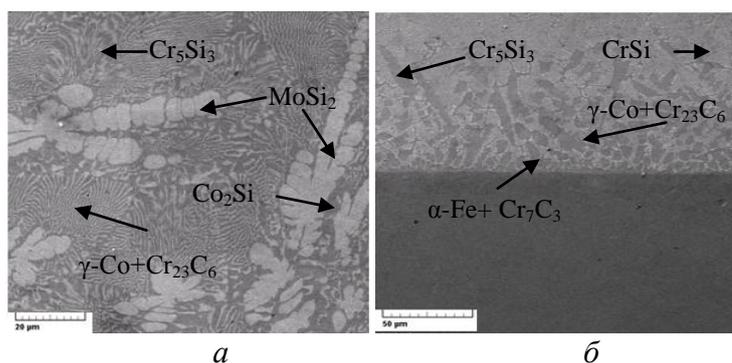
Пугачева Н.Б., Быкова Т.М., Трушина Е.Б., Малыгина И.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: tatiana_8801@mail.ru*

В настоящее время активно исследуются и находят промышленной применение технологии создания сложных заготовок и готовых изделий плазменной наплавкой порошковых материалов. Например, наплавка слоя износостойкого материала на поверхности клапанов позволяют увеличить ресурс оборудования в разы.

Цель работы – исследование структуры и свойств напавленного износостойкого покрытия и диффузионного слоя на границе покрытия с основой на фаске выпускного клапана.

В качестве наплавки использован сплав Triboloy T400 – это кобальтовый сплав с номинальным составом: 28Mo–9Cr–2,6Si–0,04C. Структура напавленного покрытия представляет собой твердый раствор на основе кобальта с эвтектической составляющей из смеси карбидов и твердого раствора (рис. а). Упрочняющими фазами, являются карбид хрома ($Cr_{23}C_6$), силицид молибдена ($MoSi_2$), кобальта (Co_2Si) и хрома (Cr_5Si_3). Структура диффузионной зоны на границе с основой состоит из твердого раствора на основе α -Fe и Co, с карбидами ($Cr_{23}C_6$ и Cr_7C_3) и силицидами (Cr_5Si_3 и Cr_5Si_3). Вблизи стали-основы происходит изменение химического состава наплавки за счет обогащения напавленного слоя атомами железа (рис. б). Толщина диффузионной зоны примерно 100 мкм при общей толщине покрытия 7 мм.



Структура напавленного покрытия: а – напавленное покрытие; б – диффузионная зона

Средний уровень микротвердости материала покрытия, находится в пределах 530 HV 0,5 (табл.). Высокие значения модуля упругости говорит о хорошей плотности наплавки и отсутствии микропор в диффузионной зоне. Плавное изменение условного показателя запаса пластичности (ϕ) от покрытия в основу обеспечивает меньшее растрескивание покрытия при эксплуатации.

Таблица – Результаты микроиндентирования

Слои	HV 0,5	E , ГПа	$E_{упр.}$, ГПа	ϕ , %
Напавленное покрытие	590	261	237	81
Диффузионная зона	563	260	236	84
Основа	329	228	208	88

Таким образом, наплавка повышает микромеханические характеристики поверхностного слоя, что приводит к росту износостойкости покрытия. Плавное распределение свойств от наплавленного покрытия в основу предотвращает растрескивание покрытия в области высоких температур.

Работа выполнена по госбюджетному заданию ФАНО тема № 0391-2016-0002

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СВАРНОГО СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ

Федоров Ю.Ю., Саввина А.В., Васильев С.В., Родионов А.К.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН,
20, ул. Автодорожная, г. Якутск, 677007, Российская Федерация,
e-mail: yuristan@yandex.ru, io1982@mail.ru, spira_ira_vas@mail.ru

В действующей в настоящее время нормативной методике определения качества сварного соединения полимерных труб критерием определения качества соединения является характер разрушения образца: недопустим хрупкий разрыв по плоскости сварки. Однако разрушения хрупкого характера в плоскости сварки свидетельствуют о грубых нарушениях технологии сварки, таким образом, получаемые результаты испытаний не характеризуют материал с позиции свариваемости, и данную методику следует признать малоинформативной с точки зрения ее использования при корректировке технологических режимов проведения сварочных работ.

Трудность задачи прогнозирования показателей длительной прочности сварных соединений по результатам их кратковременных испытаний состоит в том, что образец необходимо разрушить в области сварного соединения. Такое разрушение происходит в испытаниях на длительную прочность. В испытаниях на кратковременную прочность образец разрушается вне области сварного соединения. Для того чтобы разрушение образца со сварным швом в испытании на кратковременную прочность происходило в области сварного соединения, на образцы-полоски предварительно наносились надрезы. Испытания надрезанных образцов (гладких и шовных) позволило определить предел трещиностойкости I_C , вычисляемый по формулам для коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} . Эти величины получены расчетно-экспериментальным путем при температуре 213 К с целью обеспечения условий локализованной текучести в вершине надреза и наиболее близки к истинным значениям $I_C = K_{IC}$.

В экспериментах использовались образцы вырезанные из труб ПЭ63, ПЭ80 и ПЭ100 в форме полосок (6,56×16,4×120 мм) с краевой поперечной трещиной при одноосном растяжении. Сварное стыковое соединение со снятым гратом находилось в средней части рабочей зоны полоски. Надрезы глубиной 5,75 мм наносили ножовочным полотном и заостряли лезвием бритвы. Кратковременные испытания на растяжение проводились при температуре 213 К и скорости движения траверсы машины 100–500 мм/мин.

По результатам проведенных испытаний выявлено, что для ПЭ63, ПЭ80 и ПЭ100 значения I_C в области шва меньше чем в основном материале. В среднем уменьшение предела трещиностойкости I_C в области шва по отношению к основному материалу трубы составило: для ПЭ63 ~ 25 %, для ПЭ80 ~ 21 % и для ПЭ100 ~ 11 %. Наименьшее уменьшение I_C для ПЭ100 свидетельствует о его значительно лучшей «свариваемости» по сравнению с ПЭ80 и ПЭ63. Эти данные позволили подтвердить гипотезу об охрупчивании области сварного соединения по отношению к гладкому телу трубопровода и объяснить локализацию разрушения образцов преимущественно «по шву» в испытаниях на длительную прочность.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ТРУБЫ И МУФТЫ СМЕННЫМИ НАСАДКАМИ ДЛЯ РАСТРУБНОЙ СВАРКИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Васильева М.А., Старостин Н.П.

*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН,
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Российская Федерация,
e-mail: ewa@mail.ru, nikstar56@mail.ru*

По нормативным документам сварные соединения полиэтиленовых труб для газопроводов между собой и с помощью соединительных деталей из полиэтилена рекомендуется проводить при температуре окружающего воздуха от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. В случаях необходимости проведения сварки при других температурах воздуха работы выполняются под укрытием, в котором поддерживается температура из допустимого температурного интервала. Выполнение такой сварки связано с большими энергетическими затратами и длительными подготовительными работами, что недопустимо в аварийных ситуациях. Актуальной является задача разработки технологии оперативной сварки полиэтиленовых труб при низких температурах без использования укрытий.

Ранее был предложен и научно обоснован способ стыковой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах на основе управления тепловым процессом сварки в зоне сварного соединения. Установлено, что предварительный подогрев свариваемых труб на небольшую длину вылета, оплавление торцов труб и осадка в стандартном режиме с дальнейшим охлаждением сварного соединения в теплоизоляционной камере определенного размера позволяет получить соединение с необходимым качеством. Для разработки аналогичного способа сварки в раструб полиэтиленовых труб при температурах воздуха ниже нормативных необходимо исследовать тепловой процесс на всех этапах сварки, включая предварительный подогрев.

В работе математическое моделирование теплового процесса используется для разработки технологии раструбной сварки при температурах ниже нормативных. Рассматривается этап подогрева свариваемых концов полиэтиленовой трубы и муфты с помощью специальных сменных насадок для последующей сварки в условиях низких температур. Моделируется тепловой процесс в полиэтиленовой трубе (муфте), контактирующей со сменной насадкой, в основании которой поддерживается постоянная температура с помощью нагревательной пластины с известной температурой. Предполагается, что сменная насадка предварительно разогрета с помощью нагревательной пластины в течение определенного времени и его температурное поле в начальный момент времени известно из расчета.

Методом конечных разностей решена осесимметричная задача теплопроводности в цилиндрических координатах с граничными условиями первого и третьего рода, а также и условиями идеального теплового контакта на поверхностях паза насадки и трубы (муфты). Расчеты проводились для трубы SDR 11 ПЭ100 с диаметром 90 мм. Вычислительными экспериментами исследован процесс разогрева сменной насадки при низких температурах окружающего воздуха. Расчетами установлено, что для эффективного разогрева сменной насадки в его пазы необходимо вставлять отрезок трубы (муфты). Представлены результаты расчетов, показывающие получение распределения температуры в стенке трубы (муфты), близкого к однородному, путем подогрева сменной насадкой и последующего свободного охлаждения.

Предложенная методика может быть использована для определения технологических параметров предварительного подогрева (продолжительности подогрева и охлаждения) для полиэтиленовых труб и муфт различного диаметра при низких температурах окружающего воздуха.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 08X18H10T В ОБЛАСТИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

Ведерникова А.И., Плехов О.А.

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
д. 1, ул. Ак. Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: terekhina.a@icmm.ru*

Построение критериев, способных адекватно оценивать момент разрушения металлов при динамическом нагружении с учетом эффектов концентрации напряжений представляет собой большой научный и практический интерес. Одним из перспективных подходов к оценке прочности материалов является теория критических дистанций [1], включающая группу методов (метод точки, метод линии, метод площади), согласно которым оценка прочности при квазистатических нагрузках может быть произведена путем последующей обработки линейно-упругого поля напряжений в так называемой «зоне процесса». Поскольку механический отклик, механические свойства и поведение металлических материалов с концентраторами напряжений, подвергнутых динамическому нагружению, отличаются от наблюдаемых при квазистатическом нагружении, авторами совместно с английскими коллегами была предложена модификация теории критических дистанций на случай динамического нагружения [2], основанная на степенных зависимостях предела прочности и критической дистанции от скорости деформации (нагружения).

Работа посвящена верификации динамической теории критических дистанций на основе экспериментальных данных по одноосному растяжению стальных образцов с концентраторами напряжений (08X18H10T, 20X13 и Ст3) при скоростях деформирования 10^{-3} – 10^3 с⁻¹ с целью расширения области применения разработанной методики. Экспериментальные данные по растяжению при высоких скоростях 10^3 с⁻¹ были предоставлены НИИ механики ННГУ и были получены с использованием экспериментальной установки, реализующей метод РСГ (схема испытаний на растяжение согласно модификации Николаса [3]). Для получения диаграмм деформирования материала при скоростях деформации $\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} с⁻¹ в ИМСС УрО РАН использовалась стандартная электромеханическая испытательная машина «Shimadzu AG-X Plus» и видеозкстензометр TRViewX240S f12.5.

Проведенные исследования подтвердили, что модифицированная теория критических дистанций на случай динамического нагружения позволяет оценить прочность стальных образцов с концентраторами напряжений с погрешностью, не превышающей ± 20 %, что является хорошей инженерной точностью. Высокий уровень точности был достигнут независимо от применяемого метода (метод точки, метод линии, метод площади). Применение теории критических дистанций позволяет существенно сократить программу экспериментов при определении предельных нагрузок и может быть использовано в качестве средства экспресс-диагностики, позволяющего определить надежность и безопасность эксплуатации конструкций с концентраторами напряжений.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16-48-590148 p_a, 18-31-00293 мол_a.

Литература

1. Taylor D. The Theory of Critical Distances: A New Perspective in Fracture Mechanics. – Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo : Elsevier, 2007. – 306 p.
2. A novel reformulation of the Theory of Critical Distances to design notched metals against dynamic loading / T. Yin, A. Tyas, O. Plekhov, A. Terekhina, L. Susmel // Materials and Design. – 2015. – Vol. 69. – P. 197–212.
3. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain // Experimental Mechanics. – 1981. – Vol. 21. – P. 177–185.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НОЖЕЙ КУТТЕРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ

Веремейчик А.И.

*УО «Брестский государственный технический университет»,
267, ул. Московская, г. Брест, 224017, Беларусь,
e-mail: vai_mrtm@bstu.by*

Измельчители (ножи), используемые на универсальных куттерах при измельчении пищевых продуктов, изготовлены из хромистой жаропрочной нержавеющей стали 14X17H2 ГОСТ 5632–2014 и упрочнялись объемной закалкой до 42–48 HRC. В процессе эксплуатации ножи подвергались кавитационному, механическому и коррозионному изнашиванию и имели короткий срок эксплуатации. Визуальные обследования изношенных ножей показали ряд типичных дефектов – затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне.

Для упрочнения рабочей зоны ножей предложено применить поверхностную плазменную закалку (ППЗ) для создания поверхностного слоя измельчителя с высокой твердостью и износостойкостью. С целью определения оптимальных режимов процесса ППЗ и разработки рекомендаций для оптимизации геометрии детали проведено исследование температурных полей, напряжений и деформаций, выполненное с применением конечно-элементного вычислительного комплекса ANSYS. Для проведения вычислительных экспериментов разработана трехмерная модель ножа. В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам дискретной модели ножа пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде конвекции. Во избежание оплавления максимальная температура на поверхности ножа должна быть на 3...5 % меньше температуры плавления стали (1400 °C). На всех поверхностях модели задавалась конвекция, так как температура плазменной струи в центре составляет около 20 000 °C. Известно, что тепловой поток плазменной струи распределяется по ширине пятна нагрева по закону, близкому к кривой вероятности Гаусса. Исходя из этого на нагреваемой поверхности коэффициент конвекции задавался различным по ширине пятна нагрева, соответствующий нормальному распределению.

При решении задачи термоупругости нож «закреплялся» по нижней торцевой поверхности для ограничения перемещения в направлении, перпендикулярном поверхности ножа, и по поверхности шпоночного паза для ограничения перемещения в направлении, параллельном его поверхности. Получены распределения температурных полей, эквивалентных напряжений и суммарных перемещений на рабочей зоне измельчителя при различных режимах нагрева.

Для осуществления процесса плазменной поверхностной закалки в комплексе с вакуумно-плазменной установкой был разработан специальный манипулятор, при помощи которого осуществляется перемещение детали относительно плазменной дуги с заданной скоростью. Частота вращения стола манипулятора может регулироваться в пределах 0,5–180 об/мин. Упрочняемая деталь располагалась на столике манипулятора горизонтально. Осуществлен процесс поверхностной плазменной закалки ножей путем нанесения дорожек с шагом 1,5 мм на тело детали. По результатам экспериментов определены оптимальные параметры процесса ППЗ: скорость движения пятна нагрева $v = 10$ мм/с, расход аргона $Q_{Ar} = 1,2$ л/мин, расход азота $Q_{N_2} = 3,6$ л/мин, ток дуги $I = 28$ А. В результате микротвердость поверхности рабочей зоны ножа увеличена до 466–600 HV_{0,1}.

Исследования износостойкости измельчителей позволили получить зависимости относительного износа их элементов в различных сечениях после упрочнения объемной и поверхностной плазменной закалкой. Результаты показали, что износостойкость измельчителей, упрочненных путем ППЗ, более чем в 2 раза выше, чем после объемной закалки.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМОЛИБДЕНОВЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

Пышминцев И.Ю., Веселов И.Н., Мальцева А.Н.

*ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности»,
д. 30, ул. Новороссийская, г. Челябинск, 454139, Российская Федерация,
e-mail: PyshmintsevIU@rosniti.ru, VeselovIN@tmk-group.com*

В качестве объектов исследования использованы образцы, отобранные от бесшовных горячедеформированных высокопрочных труб нефтяного сортамента (σ_T 760÷860 МПа), предназначенных для эксплуатации в кислых средах, изготовленных из низколегированных сталей типа 26ХМФА.

Для данного вида трубной продукции традиционно применяют стали, подвергаемые финишной термической обработке – закалке с высоким длительным отпуском. В качестве микролегирующих элементов в конструкционные улучшаемые стали обычно вводят сильные карбидообразующие элементы: V, Ti, Nb в количестве порядка 0,05 мас. %. Они увеличивают прокаливаемость стали и способствуют формированию мелкозернистой структуры. Легирование стали малыми добавками V, Ti, Nb позволяет получать при отпуске дисперсные карбиды, эффективно упрочняющие матрицу.

Поскольку материал труб данного типа должен сочетать высокие прочностные свойства и стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением, необходимо его высокое металлургическое качество (узкие допуски содержания химических элементов, высокая чистота по неметаллическим включениям, минимальная полосчатость структуры). Другим необходимым условием является строгое соблюдение регламента операций термической обработки – закалки с высоким длительным отпуском (при температуре ~ 700 °С), что позволит минимизировать дислокационный механизм упрочнения, заменив его на дисперсионный, который более предпочтителен с точки зрения сопротивления материала сульфидному растрескиванию под напряжением.

При разработке новой марки стали, на стадии математического моделирования было использовано специализированное программное обеспечение «Thermo-Calc-3.01». Его применение позволило сделать предварительную оценку влияния легирующих элементов Mo, Cr, V (их соотношения) на тип формирующихся карбидных фаз, а также для прогноза наиболее вероятного температурного интервала их образования.

Предложенный подход позволил разработать новую марку низколегированной хромомолибденовой стали для производства высокопрочных труб нефтяного сортамента (σ_T 760÷860 МПа), предназначенных для эксплуатации в кислых средах (стойких к сульфидному растрескиванию под напряжением).

ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА B95/SiC С СОДЕРЖАНИЕМ ЧАСТИЦ SiC 20 ОБ. % ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 450 °С

Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Нестеренко А.В., Копеина А.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: mmm@imach.uran.ru*

Причиной научного интереса к металломатричным композитам (ММК) является возможность улучшения механических свойств легких металлов и сплавов в широком температурном диапазоне посредством добавления твердых частиц. Алюминий и его сплавы наиболее часто используются в качестве материала матрицы при производстве ММК. Такие материалы, как карбид кремния [1], керамические частицы [2], карбид бора [3] и карбид титана [4], используются в качестве наполнителя для ММК. В большинстве приведенных работ авторы оценивают стандартные механические свойства ММК, такие как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, твердость и др. Однако предельная пластичность ММК в процессах обработки металлов давлением не может быть однозначно оценена по стандартным механическим свойствам, так как стандартные механические свойства определяют в узком диапазоне напряженного состояния. Эти свойства могут значительно отличаться в процессах обработки давлением. Поэтому большое значение имеет оценка предельной пластичности (степени деформации до разрушения) ММК в широком диапазоне изменения напряженно-деформированного состояния. В работе исследовано влияние напряженного состояния на предельную пластичность металломатричного композита B95/SiC с содержанием частиц SiC 20 об. % при температуре 450 °С. Величина предельной пластичности металла количественно характеризуется накопленной степенью деформации сдвига до разрушения. Для оценки напряженного состояния использовали безразмерные инвариантные параметры: коэффициент напряженного состояния k и коэффициент Лодэ–Надаи, характеризующий вид напряженного состояния. Для исследования предельной пластичности испытания проводили в условиях преобладающих сжимающих напряжений: испытания на сжатие цилиндрических образцов, испытания на сжатие образцов типа «колокольчик», а также испытания на кручение цилиндрических образцов. Для определения напряженно-деформированного состояния в месте разрушения выполнено моделирование испытаний методом конечных элементов. По результатам испытаний и моделирования получена диаграмма предельной пластичности, которая может быть использована при моделировании процессов разрушения ММК B95/SiC с содержанием частиц SiC 20 об. %. Диаграмма предельной пластичности может быть использована в пределах изменения $-1,02 < k < 0,55$ и $0 < \mu_\sigma < +1$.

При проведении моделирования использовано программное обеспечение Лаборатории структурных методов анализа и свойств материалов и наноматериалов ЦКП УрФУ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 14-19-01358. Испытания проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» Института машиноведения УрО РАН.

Литература

1. Narasimha B. G., Krishna V. M., Xavier A.M. A review on processing of particulate metal matrix composites and its properties // International Journal of Applied Engineering Research. – 2013. – Vol. 8. – P. 647–666.
2. Preparation of 6061Al-Al₂O₃ MMC's by stir casting and evaluation of mechanical and wear properties / V. Bharath, M. Nagaral, V. Auradi, S. A. Kori // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 6. – P. 1658–1667.

3. Rebba B., Ramanaiah N. Studies on mechanical properties of 2024 Al-B₄C composites // *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*. – 2014. – Vol. 4, iss. 1. – P. 42–46.
4. Selvakumar N., Sivaraj M., Muthuraman S. Microstructure characterization and thermal properties of Al-TiC sintered nano composites // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 107. – P. 625–632.

ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЙ-ГРАФЕНОВОГО МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА С СОДЕРЖАНИЕМ ГРАФЕНА 2 МАС. % ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 300 °С

Вичужанин Д.И., Елшина Л.А., Мурадымов Р.В., Нестеренко А.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: mmm@imach.uran.ru*

Металломатричные композиты (ММК) обладают рядом ценных механических и термофизических свойств. Благодаря этому они находят все более широкое применение в качестве конструкционного материала в различных отраслях промышленности. Алюминий и его сплавы наиболее часто используются в качестве матрицы ММК. В качестве наполнителя могут быть использованы керамические частицы, алмазы, оксид алюминия, карбид кремния и др. Наиболее перспективным является создание новых алюмоматричных композитов с содержанием нано- и микрочастиц углерода, таких как графит, углеродные нанотрубки и графен.

В работе получены экспериментальные данные по предельной пластичности и прочности упрочненного графеном алюмоматричного композита с содержанием графена 2 мас. % при температуре 300 °С. В качестве предельной пластичности использовали величину степени деформации сдвига в момент разрушения, которая является функцией коэффициента напряженного состояния, а также коэффициента Лоде–Надаи. Для исследования предельной пластичности использовали испытания, которые позволяют во всем диапазоне значений варьировать показатель Лоде–Надаи, а также в широком диапазоне варьировать жесткость напряженного состояния. Для определения напряженно-деформированного состояния в месте разрушения выполнено моделирование испытаний методом конечных элементов. По результатам испытаний на растяжение гладких цилиндрических образцов установлено, что в этих условиях композит обладает неограниченной пластичностью. Образцы пластически деформировались до момента, пока не происходило физическое разделение частей образца в месте разрушения, а поверхность излома при этом сузилась в линию. По результатам исследований выполнена идентификация диаграммы предельной пластичности композита при температуре 300 °С.

Полученная диаграмма может быть использована для оценки накопленной поврежденности в процессе пластического формоизменения исследованного алюминий-графенового металломатричного композита.

При проведении моделирования использовано программное обеспечение Лаборатории структурных методов анализа и свойств материалов и наноматериалов ЦКП УрФУ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-01011. Испытания проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» Института машиноведения УрО РАН и «Состав вещества» Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСРЕДНЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ СПЕКЛОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦИЙ И ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПЕРИОДИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ОБЪЕКТАХ

Владимиров А.П.

ИМАШ УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: vap52@bk.ru

Согласно разным литературным источникам, от 50 до 90 % элементов техники разрушаются вследствие многоциклового усталости. Несмотря на большое количество публикаций по данной теме, в настоящее время отсутствуют методы оценки и расчета остаточного ресурса объектов, которые удовлетворяли бы требованиям инженерной практики. По-видимому, сложившаяся ситуация связана с отсутствием простых и надежных методов неразрушающего контроля, позволяющих без остановки испытания или эксплуатации объектов контролировать развитие необратимых процессов на локальном уровне. Разработка таких методов является актуальной задачей физики и техники. Цель работы – ознакомление участников конференции с новым когерентно-оптическим методом, позволяющим в реальном времени изучать усталостные явления, возникающие в материалах при испытании на усталость.

Кратко рассматривается теория метода. Обсуждаются формулы, связывающие средние значения, дисперсию и время релаксации разности перемещения точек в малой области объекта и среднее значение интенсивности \tilde{I} , временную автокорреляционную функцию этой интенсивности в сопряженной области плоскости изображения объекта. Анализируются погрешность и предельная чувствительность метода, который позволяет оценивать перемещения точек поверхности на величину порядка 1 нм на базах 10 мкм. Рассматриваются возможности использования метода для определения локальных упругих и пластических деформаций, а также для контроля изменения шероховатости поверхности.

Возможности метода демонстрируются на примерах испытания модельных и конструкционных материалов на многоцикловую усталость. Рассматривается техника эксперимента. Демонстрируются распределения коэффициентов корреляции η фрагментов спеклового изображения призматических образцов, изготовленных из металла и из оргстекла с надрезом типа Шарпи и без надреза. Кадры с указанными распределениями были получены для разных циклов периодических деформаций. Для образцов с надрезом типа Шарпи обсуждаются особенности перехода первоначально сплошного тела в разрушенное состояние, а также найденные предельные изменения плотности оргстекла и изменения формы и рельефа поверхности металла. Сравниваются особенности локализации деформаций в образцах с надрезом и без надреза.

Обсуждаются зависимости $\tilde{I}(t)$ и $\eta(t)$, соответствующие одному периоду циклических деформаций консольной балки, и возможности их использования для контроля распределения упругих деформаций на разных фазах цикла.

На основе полученных данных делается вывод о перспективности метода для изучения усталостных явлений и его применения в неразрушающем контроле.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 17Г1С, ПОДВЕРГНУТОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МЕХАНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Панин С.В.^{1,2}, Власов И.В.¹, Почивалов Ю.И.¹,
Еремин А.В.¹, Станкевич Р.В.²

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, Томск, 634021, Российская Федерация,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
д. 30, пр. Ленина, Томск, 634036, Российская Федерация,

e-mail: syp@ispms.tsc.ru, ylasov.ilya.viktorovich@gmail.com, pochiv@ispms.tsc.ru,
ave@ispms.tsc.ru, roman3014@mail.ru

Одним из наиболее распространенных способов изготовления конструкций сложной формы является сварка, сочетающая невысокую стоимость и трудоемкость процесса, снижение массы конструкции, герметичность и плотность, возможность автоматизации процесса сварки, включая толстые профили. Однако для сварных соединений существует значительное количество проблем, связанных, с низкой усталостной долговечностью, ударной вязкостью и др.

Одним из распространенных и эффективных методов модификации сварных соединений является ультразвуковая послесварочная ударная обработка (УПЗО) поверхности. В результате происходит формирование сжимающих напряжений, способствующих повышению трещиностойкости, предела прочности, увеличению износостойкости. Однако концентрация деформационного воздействия преимущественно в поверхностном слое не раскрывает в полной мере потенциал УПЗО, как импульсного высокоэнергетического воздействия, способного при определенных условиях кардинально влиять на структуру металла. Для этого необходимо контролируемым образом повысить глубину и интенсивности воздействия.

Прогресс в данном направлении может быть достигнут за счет создания в кристаллической решетке металла возбужденного состояния путем комбинированного импульсного электрофизического воздействия в процессе УПЗО. Такая комбинированная импульсная механотермическая обработка должна стимулировать распространение потоков массопереноса и деформационных дефектов на различных масштабных уровнях, повышая объем материала, испытывающего воздействие упругих (ультразвуковых) волн и, увеличивая тем самым эффективность протекания процессов модификации (гомогенизации) структуры при постсварочной обработке. Данный метод показал хорошие результаты при модификации сварных швов титановых сплавов, где применение только ультразвуковой ударной обработки не давало заметных положительных результатов.

Цель работы – изучение влияния комбинированной импульсной механотермической обработки на структуру и механические свойства сварного соединения стали 17Г1С.

Из проведенных исследований следует, что в процессе УПЗО основное воздействие концентрируется в поверхностном слое (не более 100 мкм), где происходит накопление дефектов, увеличение плотности дислокаций и разрушение цементитных пластин. Микроструктура образца после комбинированной обработки имеет схожую структуру, однако, пластическая деформация в поверхностном слое проявляется в меньшей степени. Это подтверждают результаты измерения микротвердости: образцы после УПЗО имеют в среднем более высокие значения микротвердости по сравнению с образцами после комбинированной обработки.

При статическом растяжении после УПЗО и комбинированной обработки наблюдается повышение предела прочности по сравнению со стандартным сварным швом. Так же происходит снижение относительного удлинения, в наименьшей степени это выражено у образцов после комбинированной обработки. Частичное сохранение пластичности у образцов после комбинированной обработки приводит к небольшому повышению ударной вязкости при

комнатной температуре, в сравнении со стандартным швом и УПЗО, но при понижении температуры испытания до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ эта разница нивелируется.

Таким образом, можно сказать, что комбинированная импульсная механотермическая обработка, как и УПЗО, приводит к повышению предела прочности сварного соединения, но за счет более равномерного распределения деформационного упрочнения позволяет в большей степени сохранить пластичность, что положительно сказывается в условиях ударного нагружения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00679.

INFLUENCE OF LONG-TERM OPERATION ON THE STRUCTURE AND IMPACT TOUGHNESS OF 09Mn2Si PIPE STEEL

Vlasov I.V.¹, Panin S.V.^{1,3}, Marushchak P.O.², Eremin A.V.¹, Byakov A.V.¹

¹*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634055, Russian Federation,*

²*Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 46001, Ukraine,*

³*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation,*

e-mail: vlasov.ilya.viktorovich@gmail.com, svp@ispms.tsc.ru, maruschak.tu.edu@gmail.com, eremin_av@bk.ru, biakov.anton@gmail.com

Main oil and gas pipelines are strategic industrial facilities. Monitoring their structural integrity is of crucial importance. Safe operation of a pipeline over several decades assumes comprehensive understanding of the reasons for their microstructure degradation. These studies are of particular importance for oil and gas pipelines operating for a long period of time in the Far North, where the annual temperature variation can be as large as 100 °C [1].

The degradation of the 09Mn2Si primary steel used in a main gas pipeline after 37 years of operation is investigated in this paper. For low-carbon ferrite-pearlite pipe steel operating at low temperatures, the ductile-to-brittle transition leading to a sharp decrease in toughness is of particular concern [2]. Impact testing provides the most common express way to assess the fracture toughness.

A study was performed to explore the strength, ductility, fatigue life, and fracture toughness of the 09Mn2Si steel in the line section of a gas pipeline after 37 years of service. Similar studies were carried out for the same steel taken from the reserve stock of pipes.

It is shown that the long-term service causes no significant cementite redistribution; however, hydrogenation can occur in the steel, which further leads to decarburization. Strain aging is slightly pronounced, and it is observed as the precipitation of fine carbides in the grain bulk.

The revealed degradation exerts little effect on the results of hardness measurements. The reason for this should be the development of two competing processes; namely, softening as a result of decarburization, and hardening due to pitting of dislocations on carbide precipitates.

On the other hand, the fracture toughness of the fatigued 09Mn2Si steel decreased to a much greater extent by a factor of ~1.5 in room temperature tests. The decrease in the cracking resistance under impact bending is, first of all, related to a decrease in the energy capacity of the steel resulting from embrittlement. Thus, the fracture toughness proves to be the parameter most sensitive to the microstructural changes that have occurred within 37 years of service.

The reported study was funded by RFBR, research project No. 18-38-00679.

References

1. Panin V.E., Derevyagina L.S., Lebedev M.P., et al. Scientific foundations of cold embrittlement of structural steels with BCC lattice and their structure degradation under negative temperatures // *Phys. Mesomech.* – 2016. – Vol. 19. – No 2. – pp. 5–14.
2. Nastich S. Yu., Soya S. V., Molostov M. A., et al. Effect of temperature for the start of finish rolling on coiled steel X70 microstructure and cold resistance // *Metallurgist.* – 2012. – Vol. 56. – Iss. 7, pp. 519–525. DOI:10.1007/s11015-012-9608-6.

ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Власова Д.В., Плохих А.И.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный Исследовательский Университет), (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
д. 5 стр. 1, ул. 2-я Бауманская, г. Москва, 105005, Российская Федерация,
e-mail: plokhikh@bmstu.ru

Для большинства машиностроительных сталей переход из вязкого состояния в хрупкое происходит при незначительных отрицательных температурах, что представляет опасность как в условиях крайнего севера, так и в зимний период в средней полосе России. Результаты ряда последних исследований показывают, что существуют способы кардинального изменения температурной зависимости ударной вязкости машиностроительных сталей, имеющей на первый взгляд парадоксальный характер. В частности установлено, что при понижении температуры испытания работа разрушения ударных образцов, вырезанных в определенных направлениях проката увеличивается, что говорит об отсутствии формального порога вязко-хрупкого перехода (ВХП) и повышении надежности материала при низких температурах. Причиной этому становится формирование слоистой структуры, благодаря которой полного разрушения ударных образцов с U-образным концентратором не происходит [1].

Другим способом получения конструкционных материалов со слоистым строением является технология, основанная на горячей пакетной прокатке композитных заготовок. Температурная зависимость ударной вязкости в области низких и криогенных температур были изучены на образцах многослойных материалов, полученных из сталей У8+08Х18Н10, 40Х13+08Х18Н10. Образцы U-образными концентраторами были изготовлены из многослойных материалов по экспериментальному технологическому маршруту, который был проведен дважды, что позволило получить полосовой прокат толщиной 10 мм, имеющий около 1500 слоев, при толщине каждого слоя около 5 мкм [2]. Результаты испытаний по определению приведенной работы разрушения (А) ударных образцов, в направлении перпендикулярном (*числитель*), и параллельном направлению проката (*знаменатель*), приведены в таблице.

Композиция	Толщина слоя, мкм	А, Дж/см ²		
		20 °С	-70 °С	-196 °С
40Х13+08Х18Н10	5,0	$\frac{357}{68}$	$\frac{357}{58}$	$\frac{102}{49}$
У8+08Х18Н10		$\frac{340}{68}$	$\frac{320}{60}$	$\frac{370}{30}$

Полное разрушение образцов отсутствует у композиций У8+08Х18Н10 до температуры равной -196 °С и -70 °С для образцов композиции 40Х13+08Х18Н10, что говорит об отсутствии формального порога (ВХП). Однако обнаруженный эффект не является нарушением общей теории, а служит ее подтверждением. Учитывая, что при снижении температуры наблюдается закономерное увеличение предела текучести, естественным становится увеличение работы на проведение пластической деформации образцов, которые благодаря многослойному строению структуры не разрушаются полностью, а подвергаются изгибной деформации.

Литература

1. Y. Kimura, T. Inoue, F. Yin, and K. Tsuzaki Inverse Temperature Dependence of Toughness in an Ultrafine Grain-Structure Steel: Science, 2008, vol. 320, pp. 1057–1060.
2. Табатчикова Т.И., Плохих А.И., Яковлев И.Л., Ключева С.Ю. Структура и свойства многослойного материала на основе сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки // Физика металлов и металловедение. 2013. – Т. 114. – № 7. – С. 633–646.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ВНУТРЕННИЕ МЕЗО- И МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ

Волегов П.С., Озерных В.С.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский пр-т, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: crocinc@mail.ru, ozernykh@yandex.ru*

При интенсивных пластических деформациях (ИПД) поликристаллических материалов важно учитывать эволюцию их внутренней структуры. Так, например, для ИПД характерно появление неоднородных внутренних полей напряжений в кристаллитах (зернах, субзернах), которые затормаживают или ускоряют движение дислокаций; эти поля напряжений способствуют развитию процессов упрочнения, разупрочнения и накопления поврежденности, наблюдаемых на мезо- и микроуровне. Особое значение при этом имеют эволюционирующие в процессе деформирования поля внутренних («обратных») мезо- и микронапряжений, возникающие вблизи различных препятствий для движения дислокаций, например вблизи дислокационных барьеров, сформированных в результате реакций с участием расщепленных дислокаций или вблизи границы зерен в результате формирования сложных дефектных структур в приграничной области. В рамках многоуровневых моделей для анализа неупругого деформирования поликристаллов, основанных на физических теориях пластичности (ФТП), возможно непосредственное включение в описание механизмов и носителей процессов деформирования на мезо- и микро- масштабных уровнях; при этом деформируемый материал рассматривается как иерархическая система, в которой носители процесса деформирования распределены по различным масштабным и структурным уровням.

Для описания полей внутренних мезо- и микронапряжений в кристаллитах в работе рассмотрен процесс образования дислокационных скоплений вблизи барьеров, образованных расщепленными дислокациями, в частности решена задача определения поля напряжений некоторого скопления дислокаций, поджатых у непреодолимого препятствия. Получена зависимость значения среднего и наименьшего расстояния между дислокациями в скоплении от их количества. Исходя из анализа результатов численных экспериментов можно сделать вывод о том, что значение среднего расстояния достигает «насыщения» и перестает изменяться при количестве дислокаций в скоплении, равном некоторому пороговому значению, конкретная величина которого зависит от упругих и пластических характеристик исследуемого материала. Полученные на микроуровне результаты, включающие в том числе геометрические и энергетические характеристики барьеров, использованы для описания возможных сценариев развития дислокационной субструктуры вблизи барьера: образование микротрещины, разрушение барьера путем его рекомбинации или преодоление барьера дислокациями скопления путем переползания.

Также рассматриваются процессы формирования дислокационных скоплений вблизи границ зерен. В частности показано, что появление внутреннего поля мезонапряжений вблизи границы, действующего на внутризеренные дислокации, может привести к блокировке системы скольжения в направлении «к границе», что в свою очередь приводит к образованию скоплений дислокаций вблизи границы. При определенных условиях может произойти слияние дислокаций в головной части скопления и образование микротрещины. Вычислены критические значения эффективных напряжений, которые могут привести к появлению микротрещин вблизи границы, получены эволюционные уравнения для плотности таких дефектов. Кроме того, в явном виде учитываются средний размер зерна и распределение зерен по размерам; было обнаружено, что материал с более мелким зерном имеет повышенные прочностные характеристики, но более подвержен образованию микротрещин вблизи границ зерен или фаз. Показано, что блокировка системы скольжения в некоторых случаях приводит к активации новых, так называемых вторичных систем скольжения, в результате дислокации «обходят» барьер, сформированный на системе скольжения, благодаря чему вероятность образования микротрещины снижается.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01292).

ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОЙ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Волков С.С., Стружанов В.В.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, 620219, Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: volkovss48@yandex.ru, stru@imach.uran.ru*

Рассматривается модель микронеоднородной среды, содержащая элементы двух порядков малости. Элементы микроструктуры обладают случайными деформационными и прочностными свойствами. Предполагается, что напряжения на макроуровне известны из решения соответствующей детерминированной задачи.

Микроструктурное условие прочности в точке X представляет собой разницу между случайным эквивалентным напряжением $\sigma(X)$ и случайным пределом прочности $\sigma_B(X)$:

$$w(X) = \sigma(X) - \sigma_B(X).$$

Если параметр $w(X) > 0$, то напряжение больше предела прочности, поэтому в элементе микроструктуры произойдет разрушение. Случайную величину $w(X)$ будем называть функцией прочности или функцией микроструктурной прочности.

Отношение предела прочности материала к максимальному напряжению в детали конструкции называется коэффициентом запаса прочности: $[n] = \frac{\sigma_B}{\sigma}$. Эта величина является

макроскопической характеристикой материала для данной конструкции. Рекомендуемый диапазон изменения $[n]$ зависит от степени ответственности конструкции и условий, при которых были получены экспериментальные данные о работе детали в конструкции. Если были использованы приближенные экспериментальные данные о прочности детали и режимах ее нагружения, параметр $[n]$ должен быть больше. Если экспериментальные данные достаточно надежны, тогда $[n]$ можно уменьшить. Учет вероятностного рассеивания экспериментальных данных также дает возможность уменьшить $[n]$.

Пусть случайные величины $\sigma(X)$ и $\sigma_B(X)$ имеют нормальное распределение вероятностей. Тогда нормальное распределение вероятностей будет иметь и случайная функция микроструктурной прочности $w(X)$. Вычисляется коэффициент вариации k_w случайной функции прочности $w(X)$. Введем для этого в расчеты также коэффициенты вариации k_σ , k_B напряжений и предела прочности. Вычисляется связь между коэффициентом запаса прочности $[n]$, коэффициентами вариации k_w , k_σ , k_B соответствующих случайных величин $w(X)$, $\sigma(X)$, $\sigma_B(X)$.

По закону распределения вероятностей функции прочности $w(X)$ находится вероятность разрушения элементов микроструктуры, определяющую относительную поврежденность материала при нагружении. Когда микроповрежденность превзойдет некоторый критический уровень, конструкция перестанет быть надежной. Относительное число разрушенных элементов микроструктуры q равно вероятности превышения напряжением микроструктурного предела прочности. Поврежденность q вычисляется с помощью интеграла по положительному бесконечному интервалу от плотности распределения $f_w(x)$ функции прочности $w(X)$:

$$q = \int_0^{\infty} f_w(x) dx.$$

Вероятность микроразрушения выражается q через коэффициент запаса прочности $[n]$ и коэффициенты вариации k_σ, k_B . В записи решения использован интеграл вероятностей Лапласа.

$$q(k_\sigma, k_B, [n]) = 0.5 - 0.5\Phi\left(\frac{1 - [n]}{\sqrt{k_\sigma^2 + [n]^2 \cdot k_B^2}}\right).$$

С ростом коэффициентов вариации k_σ, k_B увеличивается и поврежденность. Разброс прочностных свойств микроструктуры снижает сопротивление материала при деформировании.

Рассматриваются также условия прочности в двух точках X и Y , расположенных на расстоянии $r = |X - Y|$: $w(X) = \sigma(X) - \sigma_B(X)$; $w(Y) = \sigma(Y) - \sigma_B(Y)$. Коэффициент корреляции $\rho_w(r)$ функций прочности между двумя точками записывается через коэффициенты вариации k_σ, k_B .

$$\rho_w(r) = \frac{\rho_\sigma(r) + \rho_B(r)}{1 + [n]^2 \cdot k_\sigma^2 / k_B^2}.$$

Для расчета разрушения $q(X, Y)$ в двух точках рассматривается двумерное нормальное распределение. Приведен числовой пример расчета зависимости между поврежденностью в двух точках и запасом прочности при различных значениях коэффициентов вариации и коэффициента корреляции функций прочности. Показано, что увеличение запаса прочности соответствует уменьшению критической поврежденности, допускаемой при работе конструкции.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Воронцов А.В., Дмитриев А.В., Белобородов В.А.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4 пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: vorontsov.a.583@gmail.com, allsoft@hotmail.com, vabel@ispms.tsc.ru*

Несмотря на то что лазерная сварка вошла в нашу жизнь еще в 70-х гг. XIX в. данный метод остается актуальной темой и в настоящее время, в силу производственной необходимости создания качественных сварных соединений, в совокупности с высокой скоростью сварки. Лазерная сварка имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами сварки плавлением. Сварка листового проката за один проход, без использования присадочного материала, также возможна при помощи лазерной сварки. Наряду с преимуществами описываемого метода сварки имеются и дефекты, присущие лазерной сварке. Повышенная пористость, образование незакрытого парогазового канала, превышение глубины проплавления в большинстве случаев при оптимальном подборе параметров сварки описанные дефекты устраняются. Также при лазерной сварке образуются протяженные дендриты, начинающие свой рост от фронта кристаллизации и смыкающиеся в центре шва. Модификацией и переходом от дендритной структуры к зеренной или структурой с измельченными дендритами при кристаллизации занимается широкий круг исследователей. С применением ультразвукового воздействия в процессе кристаллизации становится возможным изменить характеристики микроструктуры шва и повысить качество неразъемных соединений.

Для получения экспериментальных данных использовали листовую прокат феррито-перлитной стали 09Г2С, толщиной 5,0 и 2,5 мм. Подвод ультразвукового воздействия осуществляли непосредственно в процессе сварки прижимным механизмом сонотрода к одной из свариваемых в стык пластин.

В работе представлены результаты сравнительного исследования макро- и микроструктуры материала, выявлены характерные особенности влияния ультразвукового воздействия на образование дендритной структуры сварного соединения. Показано, что с применением мощного ультразвукового воздействия повышается микротвердость сварных соединений стали 09Г2С. Также анализируется влияние ультразвукового воздействия на стабильность процесса лазерной сварки и увеличения глубины проплавления, за счет дополнительно внесенной энергии ультразвуковых колебаний. Также показано, что действие ультразвуковых колебаний при лазерной сварке препятствует образованию пор в сварных соединениях феррито-перлитной стали 09Г2С.

Из анализа проведенных исследований следует, что с применением мощного ультразвукового воздействия при лазерной сварке появляется возможность управлять характеристиками макро- и микроструктур для создания качественных неразъемных соединений, полученных посредством лазерной сварки.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0190, идентификатор проекта RFMEFI60717X0190).

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Воронцов А.В., Чумаевский А.В., Калашников К.Н.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4 пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: vorontsov.a.583@gmail.com, tch7av@gmail.com, sso.spekr.asu@gmail.com*

В ранее проведенных работах исследована структура и механические свойства образцов дисперсно-упрочняемых алюминиевых сплавов после фрикционной перемешивающей обработки как в один проход, так и в несколько проходов вдоль и поперек оси обрабатываемого образца. Выявлен ряд изменений в зеренной структуре материала при проведении перекрестных проходов. Выявлено, что в зоне перемешивания происходит как растворение ранее имевшихся в сплаве частиц, так и их последующее выпадение. Определена достаточно высокая структурная устойчивость материала к проведению смежных продольных проходов инструментом.

Цель настоящей работы – описание изменения структурно-фазового состояния при проведении многопроходной обработки сплава Д16.

Обработка листового проката сплава Д16 производилась на лабораторной установке для сварки трением с перемешиванием в ИФПМ СО РАН. Исследование распределения частиц вторичных фаз осуществляли на растровом электронном микроскопе NIKKISO SM3000. Исследование зеренной структуры проводили на оптическом микроскопе Altami MET-1С. Исследования структурно-фазового состояния проводили с применением просвечивающего микроскопа JEOL JEM-2100. Проведенные исследования показывают, что при проведении многократных проходов в зоне пересечения зон перемешивания материала листового проката в ряде случаев наблюдается небольшое увеличение среднего размера и объемной доли частиц стабильных вторичных фаз. Размер зерен зоны перемешивания также остается на уровне 1 мкм и не претерпевает значительных изменений. По границам, в тройных стыках и в телах зерен α -Al твердого раствора, залегают выделения вторичных фаз различной дисперсности и формы. Результаты идентификации типичных микродифракционных картин, полученных при проведении ПЭМ исследований, показали, что зерна α -Al твердого раствора имеют оси зон типа $\langle 110 \rangle$ (преимущественно), а также $\langle 113 \rangle$ и $\langle 134 \rangle$. То есть, кристаллографические оси типа $[110]$, $[113]$ и $[134]$ расположены параллельно оси обработки. Данное явление наблюдается также авторами других работ в области трения, трения с перемешиванием и прокатки.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013–2020 годы, направление III.23.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН НА ОСОБЕННОСТИ ДИССИПАЦИИ ТЕПЛА В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Вшивков А.Н.¹, Изюмова А.Ю.¹, Захаров А.П.², Шлянников В.Н.², Плехов О.А.¹

¹Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук
1, ул. Ак. Королева, 1614013, г. Пермь, Российская Федерация,

²Казанский Научный Центр Российской академии наук
2/31, ул. Лобачевского, 420111, г. Казань, Татарстан, Российская Федерация,
e-mail: vshivkov.a@icmm.ru

Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих эволюцию структуры материала в ходе его деформирования и разрушения, является актуальной задачей современной экспериментальной механики. Ее решение позволяет глубже понять природу процессов разрушения и разработать новые эффективные методы оценки эксплуатационного ресурса как традиционных, так и перспективных конструкционных материалов. Критерии линейной механики разрушения основаны на упругом и упругопластическом решении для простых геометрий и идеализированных трещин. Эти критерии позволяют прогнозировать особенности процессов зарождения и развития усталостных трещин [1, 2] при одноосном и сложном типах нагружения [3]. Это позволяет достичь удовлетворительных результатов в инженерных задачах, однако не в полной мере учитывает физическую природу усталостного разрушения. Энергетический подход можно рассматривать как перспективный способ получить физически обоснованный закон распространения усталостных трещин, применимый к сложному типу нагружения в широком диапазоне прикладных задач. Цель данного исследования в экспериментальном изучении диссипации тепла из вершины усталостной трещины при смешанном типе нагружения.

Были проведены усталостные испытания крестообразных образцов из титанового сплава ВТ1-0 толщиной 1 мм при двуосном нагружении с различной степенью двуосности. Для измерения тепловых потоков применялся контактный датчик теплового потока и метод инфракрасной термографии. Испытания проводились в Казанском научном центре на двуосной сервогидравлической испытательной машине Biss VI-00-502.

Распространение усталостной трещины происходило в режиме Париса. По характеру диссипации тепла распространение усталостной трещины можно разделить на две стадии. При зарождении трещины и ее медленном развитии (10^{-7} – 10^{-5} м/цикл) наблюдается стабильный тепловой поток. При скоростях трещины больших 10^{-5} м/цикл начинается процесс интенсивной диссипации тепла. На обеих стадиях можно констатировать линейную зависимость теплового потока от скорости роста трещины, однако на первой стадии скорость трещины пропорциональна произведению ее длины и теплового потока. Полученные результаты обобщают гипотезу о стадийности распространения трещины в режиме Париса на случай двуосного нагружения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-48-590148 р_а, грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1236.2017.1.

Литература

1. Paris P. C., Gomez M. P., Anderson W. E. A rational analytic theory of fatigue // The Trend in Engineering. – 1961. – № 13. – P. 9–14.
2. Matvienko Yu. G., Morozov E. M. Calculation of the energy J-integral for bodies with notches and cracks // International Journal of Fracture. – 2004. – Т. 125. – P. 249–261.
3. Surface flaws behavior under tension, bending and biaxial cyclic loading / V. Shlyannikov, A. Tumanov, A. Zakharov, A. Gerasimenko // International Journal of Fatigue. – 2016. – Т. 92. – Вып. 2. – P. 557–576.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ SiO₂ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ

Галлямова Р.Ф.¹, Галышев С.Н.¹, Бадамшин А.Г.², Мусин Ф.Ф.², Докичев В.А.¹

¹ФГБОУ ВО Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет,

д. 12, ул. К. Маркса, г. Уфа, 450008, Российская Федерация,

²Уфимский Институт химии РАН, ул. Проспект Октября,
д. 71, г. Уфа, 450054, Российская Федерация,

e-mail: rida_gallyamova@mail.ru

Композитные материалы обладают уникальными свойствами и являются одним из основных направлений развития современного материаловедения и машиностроения. Углеродные волокна широко используются в качестве армирующих элементов в композитных материалах, что обусловлено их малым весом и высокими механическими свойствами [1, 2]. Главными проблемами применения углеродных волокон в металломатричных композитах являются деструкция волокна и ухудшение его армирующих характеристик из-за химического взаимодействия с матрицей. Нанесение барьерных покрытий является наиболее эффективным методом решения этих проблем.

На сегодняшний день огромный интерес представляют керамические, в том числе оксидные, покрытия благодаря своей высокой химической устойчивости. Среди известных методов нанесения покрытий наибольший интерес получает метод золь-гель [3].

Цель настоящей работы – исследование защитных свойств диоксид-кремниевого покрытия, нанесенных на углеродные волокна методом золь-гель. Подготовка золь-гель-раствора для нанесения покрытия осуществлялась по методике, представленной в работе [4]. С помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) была исследована морфология поверхности углеродных волокон после нанесения покрытия. На поверхности волокон покрытие сформировалось не сплошное, присутствуют отдельные частички различной формы. Для оценки защитных свойств волокна подвергались отжигу при температуре 600 °С с выдержкой от 1 до 6 ч. С увеличением времени отжига деструкция поверхности волокон с покрытием проявляется незначительно, по сравнению с волокнами без покрытия [5]. Толщина волокон монотонно убывает.

В работе показана перспективность применения диоксид-кремниевого покрытия, полученного методом золь-гель для защиты углеродных волокон.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 17-48-500843 и Минобрнауки Российской Федерации в рамках Государственного Задания, Договор №11.6454.2017/ВР.

Литература

1. Луц А. Р., Галочкина И. А. Алюминиевые композиционные сплавы – сплавы будущего : учебное пособие. – Самара, 2013.
2. Carbon Materials Reinforced Aluminum Composites: A Review / Yu Huang, Qiubao Ouyang, Di Zhang, Jing Zhu, Ruixiang Li, Hong Yu // Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.). – 2014. – Vol. 27 (5). – P. 775–786. – DOI: 10.1007/s40195-014-0160-1.
3. Исследование SiO₂ покрытия, нанесенного на углеродное волокно золь-гель методом / С. Н. Галышев, Р. Ф. Галлямова, Н. Г. Зарипов, В. А. Докичев, Ф. Ф. Мусин // Композиты и наноструктуры. – 2017. – Т. 9 (3–4). – С. 162–164.
4. Vix-Guterl C., Ehrburger P. Effect of the properties of a carbon substrate on its reaction with silica for silicon carbide formation // Carbon. – 1997. – Vol. 35 (10–11). – P. 1587–1592. – DOI: 10.1016/S0008-6223(97)00117-6.
5. Xia Kedong, Lu Chunxiang, Yang Yu. Preparation of anti-oxidative SiC/SiO₂ coating on carbon fibers from vinyltriethoxysilane by sol-gel method // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 265. – P. 603–609. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.11.056.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПОРОШКОВ ДЛЯ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ Al/V₄C-КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Гладковский С.В., Кутенева С.В., Двойников Д.А., Веселова В.Е.

*Институт машиноведения УрО РАН, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: gsv@imach.uran.ru*

С развитием аддитивных технологий и методов порошковой металлургии уделяется повышенное внимание изучению параметров порошков, поскольку структура и физико-механические свойства порошковых изделий в значительной мере определяются размером и формой частиц. Известны достаточно точные методы определения гранулометрического состава порошков различной дисперсности с использованием дорогостоящего оборудования: лазерной дифракции (0,1–10 мкм), затухания ультразвуковых волн (0,01–3000 мкм), спектроскопии кросс-корреляции фотонов (1 нм–10 мкм). Главным определяющим фактором при использовании данных методов является оценка размера порошковых частиц и плотности его распределения. На практике традиционно используется ситовый анализ (≥ 50 мкм), а также более современные статические и динамические методы анализа изображений порошковых частиц ($\geq 0,5$ мкм). Преимуществом статического метода анализа изображений порошков, предварительно полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), является возможность исследования морфологических особенностей строения и определения основных факторов их формы. При этом отпадает необходимость использования специализированного оборудования для гранулометрического анализа порошков.

В процессе подготовки порошковой смеси для получения методом горячей прокатки металломатричного функционального Al/V₄C-композита с целью анализа размеров и формы исходных порошков алюминия марок ПА-4 и АПВ-86 (ГОСТ 6058-73) и карбида бора двух разных составов (F500, ГОСТ 3647) в работе был выбран метод статического анализа изображений порошковых частиц. Процесс параметризации частиц заключался в получении первичных СЭМ-изображений порошков с помощью электронного микроскопа TESCAN VEGA II XMU и их дальнейшей обработки на анализаторе изображений структур SIAMS 700. По результатам проведенного гранулометрического анализа было установлено, что порошки карбида бора состава 1 и 2 имеют близкие по значениям факторы формы (круглый фактор формы, факторы компактности, удлинения, изрезанности, средний внешний и внутренний диаметры). В тоже время алюминиевые порошки ПА-4 и АПВ-86 сильно отличаются по геометрическим показателям и морфологии, что сказывается на характере распределения наполнителя карбида бора в металломатричном Al/V₄C-композите. Алюминиевый порошок ПА-4, несмотря на более крупный средний диаметр частиц по сравнению с частицами V₄C, по многим показателям формы и морфологическому типу приближен к порошкам карбида бора. У алюминиевого порошка АПВ-86 форма порошинок близкая к гантелевидной, и он имеет самое низкое значение круглого фактора формы 0,78. Фактор компактности у всех исследуемых порошков находится примерно на одном уровне (0,78–0,85), за исключением порошка АПВ-86, который имеет пониженное значение фактора компактности 0,68. Структурные исследования Al/V₄C-композитов, полученных из смеси порошков алюминия ПА-4/АПВ-86 с добавкой 20–25 вес. % частиц V₄C, показали, что при использовании порошка ПА-4 по сравнению с порошком АПВ-86 в металломатричном Al/V₄C-композите достигается более равномерное распределение карбида бора.

Таким образом, проведенное исследование показало эффективность предложенного метода параметризации частиц алюминия и карбида бора при выборе оптимальных размеров и морфологии составляющих порошковых смесей для получения функциональных Al/V₄C-композитов.

СЛОИСТЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ С ВЫСОКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Гладковский С.В., Каманцев И.С., Кутенева С.В., Двойников Д.А., Кузнецов А.В.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: gsv@imach.uran.ru*

Активное освоение регионов Арктики и Крайнего Севера вызывает необходимость повышения надежности изделий и элементов конструкций из низкоуглеродистых сталей, работающих при пониженных климатических температурах. Такая задача может быть решена за счет дополнительного легирования строительных и машиностроительных сталей для низкотемпературного применения никелем, а также формирования в них мелко- и ультрамелкозернистой структуры. Другая возможность повышения сопротивления конструкционных материалов хрупкому разрушению при пониженных температурах заключается в использовании перспективных слоистых металлических композиционных материалов (СМКМ), содержащих прослойки разноименных и разнородных металлов и сплавов.

В связи с этим в работе в интервале температур $-196...+20$ °С проведена оценка характеристик сопротивления хрупкому разрушению при ударном нагружении СМКМ на основе низкоуглеродистых сталей различного уровня прочности (сталь 20, 09Г2С, ЭП678), меди марки М1, алюминия и его сплавов (АД0, АД1), полученных методами горячей пакетной прокатки и сварки взрывом. Толщина слоев в композитах составляла 1, 2 и 5 мм, а их количество варьировалось в пределах от 3 до 11. Использование с инструментированного маятникового копра Tinius Olsen IT542 позволило наряду со значениями ударной вязкости (KCV) определить параметр динамической трещиностойкости (J_{id}), соотношение работы удара, затрачиваемой на зарождение (A_z) и распространение трещины (A_p), а также выявить стадийность процесса разрушения СМКМ при ударных испытаниях. Наиболее высокий уровень характеристик ударной вязкости в изученных композитах при комнатной и пониженной температурах достигается при ориентации линии надреза поперек границ раздела слоев по «тормозящему» типу. При этом полного разрушения всех слоев композита на большинстве ударных образцов не наблюдалось. Установлено, что высокий уровень сопротивления хрупкому разрушению изученных СМКМ при низкотемпературных ударных испытаниях связан с торможением растущей трещины пластичными металлическими прослойками и отклонением ее направления от магистрального на границе раздела слоев. Существенное влияние на характеристики ударной вязкости слоистых композитов оказывают также химический состав и структура металла слоев, порядок их укладки и соотношение толщин.

По результатам экспериментального определения механических свойств при динамическом нагружении проведено численное моделирование процесса разрушения изученных СМКМ. Показана эффективность применения подходов математического моделирования к изучению стадийности зарождения и развития магистральной трещины в структурно-неоднородных материалах с учетом нелинейности свойств отдельных слоев композита.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта УрО РАН «Арктика» № 18-9-1-20 и гранта РФФИ №18-38-00339 мол_а.

СПЕКАНИЕ ПОРОШКОВ W-Ni-Fe, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОЛОК

Глазкова Е.А.¹, Первиков А.В.¹, Родкевич Н.Г.¹, Апкарьян А.С.¹, Мужецкая С.Ю.²

¹Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,

²ООО «Передовые порошковые технологии», 8/2к2

пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,

e-mail: [eagl@ispms.tsc.ru](mailto: eagl@ispms.tsc.ru), [pervikov@list.ru](mailto: pervikov@list.ru), [ngradk@ispms.tsc.ru](mailto: ngradk@ispms.tsc.ru), [asaktc@ispms.tsc.ru](mailto: asaktc@ispms.tsc.ru), [tomsk_ppt@mail.ru](mailto: tomsk_ppt@mail.ru)

Разработка новых жаропрочных материалов, применяющихся во многих отраслях современной индустрии – в космической технике, самолетостроении, металлургии, энергетике, химической промышленности, – обуславливают возрастающий интерес к сплавам на основе вольфрама, а также методам их получения. Вследствие высокой температуры плавления эти материалы и изделия из них производят, в основном, методами порошковой металлургии. Чистый вольфрам спекается при достаточно высокой температуре 2200–2400 °С. Но и в столь жестких условиях плотность полученных изделий не превышает 96 % от теоретической. Для снижения температуры спекания порошков и увеличения плотности материалов на основе вольфрама обычно проводят предварительную механоактивацию порошков. Перспективным направлением также является использование добавок нанопорошков. Однако применение нанопорошков ограничено трудностями, возникающими при получении механических смесей нанопорошков с микропорошками. В связи с этим большой интерес вызывают электровзрывные порошки, представляющие собой смеси микро- и наночастиц, полученные непосредственно в процессе синтеза. Цель работы – исследование процесса спекания смеси порошков W–Ni–Fe, полученных электрическим взрывом проволок.

В качестве объектов исследования использовали порошки вольфрама, никеля и железа, полученные электрическим взрывом проволок из соответствующих металлов. Порошки используемых металлов представлены смесью микро- и наночастиц сферической формы. Средний размер наночастиц вольфрама составляет 65 нм, микрочастиц – 1,1 мкм. Кроме того, в смеси присутствуют агломераты нанопорошков размером около 0,25 мкм. Наночастицы железа и никеля представлены агломератами размером около 0,4 мкм. Размер микрочастиц железа составляет около 1,5 мкм, микрочастиц никеля – около 4 мкм. Смесь порошков металлов в соотношении 90W/6Ni/4Fe мас. % получена диспергированием в жидкой среде. Обнаружено, что микрочастицы и наночастицы разных элементов равномерно перемешаны и распределены между собой.

Смесь порошков без дополнительной обработки прессовали в виде цилиндрических образцов и подвергали свободному спеканию в вакуумной печи в интервале температур 400–1500 °С, нагрев до температуры спекания проводили со скоростью 5 °С/мин. Установлено, что спекание начинается при 800 °С, максимальная скорость спекания наблюдается в интервале температур 800–1200 °С. Электронно-микроскопические исследования показали, что структура наночастиц сохраняется вплоть до 600 °С. Увеличение температуры до 800 °С приводит к спеканию наночастиц между собой, сопровождающееся равномерной усадкой образцов по длине и высоте. Образцы, спеченные при температуре 1000 и 1200 °С, показывают изменение микроструктуры. Кроме того, при температуре выше 800 °С начинается сокращение пористости и увеличение относительной плотности образцов. В интервале температур 1350–1500 °С плотность образцов достигает 98 % от теоретической плотности сплава. С увеличением температуры спекания прочность образцов увеличивается экспоненциально.

Показано, что применение порошков металлов, полученных методом электрического взрыва проволок, позволяет снизить температуру начала спекания порошков W–Ni–3Fe, достичь высокой степени равномерности распределения элементов. Спекание порошков W–Ni–Fe при 1350 °С позволяет получать образцы с плотностью свыше 98 % от теоретической.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы НТИ «Технет», проект № 35972.

ОЦЕНКА РЕСУРСА ДЕФОРМАЦИОННОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ ИНЖЕНЕРНОГО СООРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Глот И.О.¹, Шардаков И.Н.¹, Цветков Р.В.¹, Бартоломей М.Л.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН,

д. 1, ул. Королева, 614013, Пермь, Российская Федерация,

²Пермский национальный исследовательский технический университет,

д. 29, Комсомольский просп., Пермь, 614990, Российская Федерация,

e-mail: glot@icmm.ru

Оценка ресурса деформационной целостности строительных конструкций и инженерных сооружений выполняется, как правило, на основе расчетных данных и осуществляется на этапе проектирования. Но наиболее достоверно описать эволюцию деформационных процессов, развивающихся в конкретной конструкции и оценить ее реальный остаточный ресурс, можно исходя из данных, доставляемых системой on-line мониторинга. Современные достижения в области измерительной техники, электроники, информационных технологий позволяют создавать такие мониторинговые системы и организовывать их работу.

Представлены результаты работы автоматизированной системы мониторинга деформационного состояния комплекса зданий торгово-развлекательного центра, расположенного в г. Перми. Эта система была установлена в 2010 г. и до настоящего времени в автоматическом режиме успешно регистрирует вертикальные смещения элементов конструкции. В основе измерительного комплекса системы мониторинга лежит регистрация вертикальных перемещений ряда несущих колонн сооружения. Измерение вертикальных осадок осуществлялось с помощью системы гидронивелирования. Основными структурными элементами системы мониторинга являются: система первичных датчиков, система сбора и передачи данных измерений, система обработки данных измерений и система визуализации данных измерений.

Совокупность полученных данных позволяет анализировать пространственные распределения перемещений элементов конструкции, соответствующие конкретным моментам времени. Организован доступ к результатам измерений и графическим данным, расположенным на сервере системы мониторинга, через интернет в режиме удаленного доступа.

Данные, поставляемые системой мониторинга, были успешно использованы для оценки деформационного состояния наблюдаемой конструкции. Было выполнено численное моделирование деформационных процессов в системе «грунтовое основание–фундамент–здание». При этом полученная в процессе мониторинга информация об осадках фундамента использовалась для задания граничных условий при моделировании напряженно-деформированного состояния конструкции. Таким образом, был рассчитан деформационный отклик различных элементов конструкции на неравномерные вертикальные осадки опорных колонн, вызванные изменением условий в прилегающем грунтовом массиве.

Анализ данных многолетних наблюдений деформационных процессов в инженерном сооружении продемонстрировал высокую степень эффективности разработанной автоматизированной системы мониторинга. Система позволяет надежно оценивать особенности деформационных процессов, вызванных сезонными температурными колебаниями, а также внешними техногенными воздействиями. Данные мониторинга позволяют оценивать скорости процессов деформирования и давать прогноз развития критических состояний конструкции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 14-29-00172).

РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКО-МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА, ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

Петрова П.Н., Гоголева О.В., Аргунова А.Г.

*Институт проблем нефти и газа СО РАН,
20, Автодорожная, Якутск, 677007, Российская Федерация,
e-mail: oli-gogoleva@yandex.ru*

Разработка новых триботехнических материалов на основе морозостойких полимерных композитов со значительно улучшенным комплексом свойств (морозостойкость, износостойкость, химическая стойкость, прочность и т.д.) может существенно повысить работоспособность техники при низких температурах, сократить ремонтные расходы и потери от простоев.

В работе приводятся результаты исследований по разработке новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и углеродных волокон (УВ) для изготовления деталей узлов трения технических средств, эксплуатируемых в условиях холодного климата.

Исследованы полимерные композиты на основе ПТФЭ марки ПН-80 и СВМПЭ марки Gur-4150, наполненные дискретными углеродными волокнами на основе гидратцеллюзного сырья: 1) ЛО-1-12Н/40, полученная путем термообработки из однонаправленной вискозной ленты; 2) «Белум» – углеволокна марки ЛО-1-12Н/40, на поверхность которых методом плазмохимической обработки нанесен слой фторорганических соединений (ОАО «СветлогорскХимволоконо», Беларусь).

Результаты исследований и их обсуждение

Установлено, что с ростом концентрации УВ происходит снижение деформационно-прочностных характеристик ПКМ на основе ПТФЭ, а также изменение характера кривых деформации ПКМ при растяжении. Причем снижение деформационно-прочностных характеристик и изменение характера разрушения композитов, содержащих УВ марки ЛО-1-12Н/40, происходит при концентрации 5 мас. %, а при введении волокон марки «Белум» в области 10 мас. %. Это, вероятно, обусловлено разной величиной критического объемного содержания (φ_m) УВ в ПТФЭ: для УВ марки «Белум» она достигает при содержании 10 мас. %, а для УВ марки ЛО-1-12Н/40 – при 5 мас. %.

Установлено, что прочность при 5 %-м сжатии увеличивается на 80 %, а при 10 %-м – в 2 раза по сравнению с ненаполненным ПТФЭ. Это объясняется механическим торможением пластического деформирования полимерной матрицы за счет высокого содержания высокомолекулярного жесткого наполнителя и формирования армированной системы.

Снижение скорости массового изнашивания при повышении концентрации УВ, вероятно, связано с возрастанием жесткости и сопротивляемости к износу полимерного материала, в котором большой вклад вносят сами частицы УВ. При этом композиты, наполненные УВ марки «Белум», характеризуются повышенной износостойкостью по сравнению с композитами, содержащими УВ марки ЛО-1-12Н/40.

Установлено, что при наполнении СВМПЭ УВ марки ЛО-1-12Н/40 в количестве до 5 мас. % остается на уровне ненаполненного полимера, в то время как скорость массового изнашивания снижается до 3,3 раз. При наполнении СВМПЭ модифицированным волокном «Белум» наблюдается улучшение деформационно-прочностных характеристик до 10 % и снижение скорости массового изнашивания до 3,5 раз.

Установлено снижение коэффициента трения композитов по сравнению с исходным полимером, что можно объяснить уникальными антифрикционными свойствами углеродных волокон, выступающих в роли твердой смазки.

Заключение

На данном этапе исследований модификация ПТФЭ и СВМПЭ углеродными волокнами использование УВ в качестве наполнителей не привело к значимому повышению эксплуатационных свойств ПКМ, что связано с технологическими сложностями введения частиц УВ в полимер и формированию рыхлой и пористой структуры, особенно при превышении концентрации УВ выше 5 мас. %. Для более эффективного решения этой задачи необходимо применение новых методов и технологических способов, которые позволили бы улучшить взаимодействие УВ с полимерной матрицей, что должно привести к существенному повышению механических и триботехнических свойств композитов.

РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ АЛЮМИНИЙ-СТАЛЬ ДЛЯ ПАКЕТНОЙ ФОРМОВКИ УГЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА

Гомзин А.И.¹, Галышев С.Н.¹, Назаров А.Ю.¹, Варданын Э.Л.¹, Мусин Ф.Ф.²

¹ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
д. 12, ул. Карла Маркса, г. Уфа, 450008, Российская Федерация,

²Уфимский институт химии РАН,
д. 71, ул. Проспект Октября, г. Уфа, 450054, Российская Федерация,
e-mail: andre-gomzi@yandex.ru

Алюминиевый композит, армированный непрерывными углеродными волокнами, обладает следующими характеристиками: низкой плотностью, высокой удельной прочностью и жесткостью, низким коэффициентом теплового расширения, хорошей теплопроводностью [1]. Эти свойства делают углеалюминий перспективным материалом для применения в авиации, аэрокосмической, автомобильной и других промышленных отраслях.

Одним из наиболее эффективных методов получения алюминиевых композитов, армированных углеродным волокном, является метод жидкофазной пропитки под давлением [2]. Данный метод заключается в нагреве компонентов композита до температуры 700 °С в безвоздушной среде и последующего приложения давления для инфильтрации волокна расплавом алюминия, так как в нормальных условиях для этих материалов самопроизвольная пропитка отсутствует. Получение композита происходит в герметичной деформируемой оболочке из нержавеющей стали, через которую от пуансона передается давление в расплав алюминия. Химически активный алюминий в жидкофазном состоянии интенсивно растворяет сталь, проникая вглубь матрицы и образуя интерметаллиды системы Fe–Al различного стехиометрического соотношения [3]. Железоалюминиевые интерметаллиды являются прочными и хрупкими, поэтому эти фазы нежелательны для пластичной алюминиевой матрицы.

Для ограничения взаимодействия расплава алюминия и стальной оболочки в процессе получения композита на нержавеющую сталь наносились различные разделительные покрытия: графитовые смазки и покрытия с оксидом алюминия и нитридом титана, нанесенные методом ионно-плазменного напыления.

При помощи растрового электронного микроскопа были изучены границы контакта алюминия и стали для различных вариантов покрытий. Установлено, что покрытия на основе графитовых смазок пропитываются расплавом алюминия и не предотвращают взаимодействия алюминия и стали, хотя и удерживают часть растворившегося железа. Покрытия, нанесенные ионно-плазменным напылением, предотвращают взаимодействие матрицы и оболочки, но лишь локально, так как большая часть покрытия отделяется от подложки в процессе формования композита.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 17-48-500843 и Минобрнауки Российской Федерации в рамках Государственного задания, Договор № 11.6454.2017/ВР.

Литература

1. Костиков В. И., Варенков А. Н. Композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов, армированных углеродными волокнами. – М. : «Интермет Инжиниринг», 2000. – 445 с.
2. Effect of fiber orientation on mechanical properties of 2D-Cf/Al composites by liquid-solid extrusion following vacuum infiltration technique / L. H. Qi, Y. Q. Ma, J. M. Zhou, X. H. Hou, H. J. Li // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 625. – P. 343–349.
3. Исследование влияния жидкого алюминия на стойкость стального и чугунного инструмента / С. С. Жижченко, И. А. Шпарева, М. А. Турчанин, П. Г. Агравал // Литье и металлургия. – 2013. – № 4 (73). – С. 51–58.

ОЦЕНКА РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ТЕРМО-УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

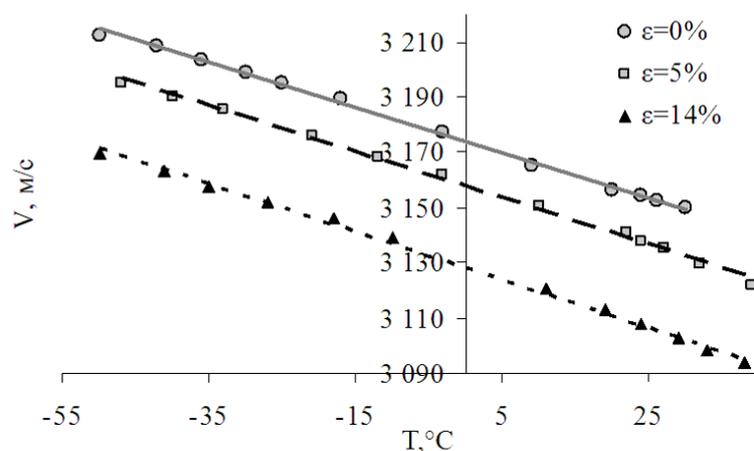
Гончар А.В., Мишакин В.В., Ключников В.А., Курашкин К.В.

*Институт проблем машиностроения РАН –
филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН»,
85, Белинского, Нижний Новгород, 603024, Российская Федерация,
e-mail: imndt31@mts-nn.ru*

Проблеме обеспечения надежности и безопасности конструкций, работающих в условиях низких температур, уделяется большое внимание. Множество работ посвящено задаче определения фактического состояния материала, которая полностью до сих пор не решена. При пластическом деформировании в качестве степени поврежденности материала можно принять ресурс пластичности $\varepsilon/\varepsilon^*$, где ε – текущее значение пластической деформации; ε^* – критическое значение пластической деформации. Для решения задачи ранней диагностики состояния материала широко используют ультразвуковой метод. Принято считать, что температурный коэффициент скорости – зависимость скорости распространения упругой волны от температуры для конкретного материала – является константой. В работе показано, что температурный коэффициент скорости для нержавеющей стали 08X18H10T не является константой и существенно зависит от величины пластической деформации.

Цель работы – проведение исследований зависимости скорости распространения ультразвуковых волн в нержавеющей стали 08X18H10T от температуры при различных степенях пластической деформации и разработка способа оценки ресурса пластичности.

В результате поэтапного одноосного растяжения плоскопараллельных образцов прямоугольного сечения из стали 08X18H10T получены линейные зависимости скорости распространения поперечных упругих волн от температуры материала для различных степеней пластической деформации (рисунок).



Температурные зависимости скоростей распространения поперечных волн

С увеличением степени пластической деформации стали скорость продольных волн уменьшается. Углы наклона кривых зависят от величины пластической деформации. Температурный коэффициент скорости $K_V = (V - V_0)/(T - T_0)$, где V – скорость распространения продольной волны при температуре T ; V_0 – скорость распространения продольной волны при комнатной температуре T_0 , составил до деформирования $\varepsilon = 0$, $K_V = -0,82$; для $\varepsilon = 5\%$, $K_V = -0,84$; для $\varepsilon = 14\%$, $K_V = -0,87$.

Ресурс пластичности ($\varepsilon^* = 60\%$) связан с температурным коэффициентом скорости K_V следующим выражением $\varepsilon/\varepsilon^* = -4,43 \cdot K_V - 3,63$.

Таким образом, при помощи ультразвуковых измерений, меняя температуру исследуемого материала можно определить величину пластической деформации и рассчитать ресурс пластичности материала.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-6069.2018.8 «Разработка способа оценки поврежденности при разрушении конструкционных сталей и металлических сплавов в жестких климатических условиях Крайнего Севера и Арктики».

ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ АРМКО-ЖЕЛЕЗА

Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С.

*Институт Машиноведения УрО РАН, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: sherlarisa@yandex.ru*

Остаточные напряжения, возникающие в элементах конструкций при их изготовлении и в процессе эксплуатации, в значительной мере определяют ресурс конструкции в целом. Обусловлено это тем, что вследствие суммирования рабочих и остаточных напряжений фактические эксплуатационные напряжения могут существенно отличаться от проектных. В связи с этим создание и совершенствование неразрушающих методов определения остаточных напряжений является важной задачей неразрушающего контроля. Наряду со стандартизованными дифракционным и ультразвуковым методами диагностики остаточных напряжений все более широкое распространение получают другие неразрушающие методы, в том числе основанные на измерении различных магнитных характеристик контролируемого объекта. С целью развития модельных представлений, объясняющих поведение магнитных характеристик от уровня остаточных напряжений, были проведены эксперименты по варьированию остаточных напряжений в пластически деформированном армко-железе путем ступенчатого отжига с определением ряда магнитных характеристик. Установлено наличие однозначной корреляции между начальной восприимчивостью, отношением величин обратимой восприимчивости к начальной восприимчивости и уровнем микронапряжений для армко-железа. Таким образом, показана перспективность использования этих параметров для оценки уровня остаточных напряжений ферромагнитных конструкционных материалов.

Работа выполнена в рамках темы гос. задания № 0391-2016-0005 и при поддержке проекта УрО РАН № 15-10-1-40.

КРУПНОМАСШТАБНОЕ КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ НА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: alex55gor@mail.ru*

В работе получены аналитические решения стационарного сдвигового (слоистого) конвективного течения вязкой несжимаемой жидкости по нагреваемой вращающейся плоскости. Течение жидкости описывается уравнениями Обербека–Буссинеска с учетом силы Кориолиса в приближении f -плоскости. Плоскость наклонена к оси вращения на угол ϕ , поэтому учитывается два параметра Кориолиса.

Скорость жидкости на верхней свободной поверхности не зависит от времени. Рассматривается движение вблизи оси вращения, поэтому термической центробежной силой можно пренебречь. Предполагается, что на свободной и твердой границах заданы градиенты температуры при условии идеального теплообмена.

Решение исходной системы представляется в следующем виде: для температуры и давления – в виде линейной функции по координатам, для скоростей V_x и V_y – как функции координаты z , скорость V_z полагается равной нулю [1, 2].

После подстановки в исходные уравнения получена краевая задача для системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, решение которой получено аналитически.

Проведен анализ зависимости решения от ряда параметров, в том числе от числа Экмана. При некотором соотношении параметров возникает эффект «остановки» жидкости. Показано, что при некоторых значениях числа Экмана возникает один или несколько слоев жидкости с обратным течением. Проведено исследование изменения толщины слоя с обратным течением со временем.

Литература

1. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // *Нелинейная динамика*. – 2013. – Т. 9, № 3. – С. 3–9.
2. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений уравнений термодиффузии // *Теоретические основы химической технологии*. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 294–301.
3. Горшков А. В. Просвиряков Е. Ю. Конвективное течение вязкой несжимаемой жидкости при твердотельном вращении // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 1–8.

ВИХРЕВОЕ КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛОСКОСТИ

Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: alex55gor@mail.ru*

В работе получено аналитическое решение вихревого течения вязкой несжимаемой жидкости по нагреваемой вращающейся плоскости. Течение описывается уравнениями Обербека–Буссинеска с учетом силы Кориолиса.

Решение исходной системы для искомых функций (температуры, давления, скоростей V_x и V_y) определяется в виде линейных функций по координатам x , y с коэффициентами, зависящими от координаты z ; скорость V_z полагается равной нулю [1–3].

На свободной границе заданы вектор градиента температуры и вектор скорости жидкости. На твердой нижней поверхности заданы условия прилипания жидкости и вектор градиента температуры.

После подстановки в исходные уравнения получена переопределенная краевая задача для системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, решение которой получено аналитически. Решение представлено в виде линейных комбинаций функций Эйри и обобщенных гипергеометрических функций (функций Гаусса).

Проведено исследование полученных решений. Показано возникновение пограничного слоя (локализованного решения) вблизи свободной поверхности.

Литература

1. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // *Нелинейная динамика*. – 2013. – Т. 9, № 3. – С. 3–9.
2. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений уравнений термодиффузии // *Теоретические основы химической технологии*. – 2016. – Т. 50. – № 3. – С. 294–301.
3. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Конвективное течение вязкой несжимаемой жидкости при твердотельном вращении // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 1–8.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Горячева И.Г., Торская Е.В.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
101-1, просп. Вернадского, Москва, 119526, Российская Федерация,
e-mail: goryache@ipmnet.ru*

Современные методы поверхностной обработки материалов, используемых в трибосопряжениях (элементы подшипников, колеса, рельсы и др.), обычно направлены на упрочнение поверхностных слоев элементов пары трения. Во многих случаях в результате обработки формируется поле остаточных напряжений, на которое накладывается напряженное состояние, возникающее при фрикционном контакте. Существует ряд работ по исследованию влияния остаточных напряжений на деформацию поверхности и распределение напряжений в области контактного взаимодействия. В рамках данного исследования рассматривается влияние остаточных напряжений на скорость накопления контактно-усталостных повреждений, возникающих при циклическом нагружении поверхностей взаимодействующих тел в условиях трения качения.

Закон накопления контактно-усталостных повреждений связывает напряженное состояние, возникающее при фрикционном контакте, и прочностные свойства материалов, зависящие от времени или числа циклов до начала разрушения. Выбор закона в каждом конкретном случае обусловлен типом исследуемого материала и условиями контактного взаимодействия, в том числе фрикционным разогревом поверхностей взаимодействующих тел. В данном исследовании рассматривались критерии, связанные с амплитудными значениями максимальных касательных напряжений.

Рассмотрена модельная задача о качении упругого цилиндра по границе упругого полупространства из того же материала в предположении что в упругом полупространстве действуют постоянные по величине растягивающие или сжимающие остаточные напряжения. Область контакта состоит из подобласти проскальзывания, в которой касательные и нормальные напряжения связаны законом трения Кулона–Амонтона, и подобласти сцепления, в которой равны скорости упругих перемещений контактирующих тел. На основании решения контактной задачи определены распределения нормальных и касательных напряжений на границе упругого полупространства, которые использованы затем для расчета суммарного поля напряжений в упругом полупространстве от действия контактных напряжений в присутствии постоянного поля остаточных растягивающих напряжений. Проведен анализ распределения максимальных касательных напряжений и их амплитудных значений в зависимости от расстояния от поверхности полупространства. Исследовано влияние относительного проскальзывания, коэффициента трения, величины растягивающих напряжений на распределение амплитудных значений максимальных касательных напряжений.

Полученные результаты использованы для анализа влияния поля остаточных напряжений, возникающего в поверхностных слоях материала рельса при поверхностной обработке, на скорость накопления контактно-усталостных повреждений. Рассматривалась только дорожка катания, поскольку именно на ней образуются выщербины и трещины, обусловленные механизмом контактной усталости. Были использованы экспериментальные данные для остаточных напряжений, полученные в АО «ВНИИЖТ». В качестве варьируемых входных параметров задачи рассматривались нагрузка на колесо, коэффициент трения, продольное проскальзывание. Проведен анализ влияния входных параметров задачи на амплитудные значения максимальных касательных напряжений и на скорость накопления контактно-усталостных повреждений.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310379-5). Контактно-усталостное разрушение рельса исследовалось в рамках гранта РФФИ 17-20-01147 офи_м_РЖД.

ОПИСАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

Грибов Д.С., Трусов П.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, 614990, Пермь, Российская Федерация,
e-mail: gribowdmitrii@yandex.ru*

Пластическое деформирование кристаллических материалов приводит к существенному изменению структуры на различных масштабных уровнях. Модели, описывающие упрочнение, обычно используют такие характеристики процесса деформирования, как накопленные пластические деформации, накопленные сдвиги и другие, неявным образом описывающие изменения строения материала [1]. Описание упрочнения с учетом эволюции характеристик материала (размеров зерен, границ зерен, дефектных структур) позволяет более точно описывать процессы пластического деформирования, одновременно с этим оценивать запасенную энергию дефектов, которая может быть высвобождена, в том числе и при разрушении материала. Увеличение критических напряжений при пластическом деформировании связано с накоплением дефектов [2]; при этом в некоторых материалах может происходить образование барьеров скольжению дислокаций, приводящее к резкому увеличению плотностей дефектов на барьерах и общему увеличению плотностей дефектов в материале, приводящее к серьезному (в несколько раз) повышению критических напряжений.

Основной целью работы является разработка и внедрение подмодели, описывающей изменение плотностей дефектов в ходе деформирования, а также зависимость критических напряжений на системах скольжения от общих накопленных плотностей дефектов и барьеров скольжению, в существующую многоуровневую модель [3]. К задачам относится идентификация и верификация параметров модели, а также проведение численных экспериментов по исследованию деформирования материалов с различной энергией дефекта упаковки, в том числе – при сложном и циклическом нагружении.

В работе использован континуально-дискретный подход к описанию пластического деформирования кристаллического агрегата. Существующая модель описания пластического деформирования мезоуровня использует единственную моду пластического деформирования – скольжение краевых дислокаций по предписанным системам скольжения. К данной модели предлагается добавить мезоуровень 2, масштабно совпадающий с мезоуровнем 1. На мезоуровне 1 описывается деформирование кристаллитов в терминах скоростей сдвигов, определяются действующие напряжения, на мезоуровне 2 анализируется эволюция плотностей дефектов (дислокаций, барьеров различной природы), определяются средние скорости движения дислокаций, критические напряжения и скорости сдвигов (выражаемая с использованием соотношения Орована в скоростях).

В качестве основных механизмов эволюции плотностей дефектов были выбраны наиболее значимые процессы изменения плотностей барьеров [4]. Учитывается образование новых дислокаций по механизму работы источников Франка–Рида, реакции аннигиляции дислокаций противоположных знаков, приводящих к уменьшению плотностей дефектов. Важным является описание реакций по образованию и разрушению барьеров, процессов закрепления дислокаций на образованных барьерах и обхода барьеров при рекомбинации барьера, либо за счет термической активации (переползания). Учитываемые упругие поля от накопленных дефектов позволяют описать зависимость критических напряжений от плотностей дефектов и плотностей барьеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-01-00379-а).

Литература

1. Хирт Дж., Лотэ И. Теория дислокаций. – М. : Атомиздат, 1972. – 599 с.
2. Rice J. R. Inelastic constitutive relations for solids: an internal variable theory and its application to metal plasticity// Journal of Mechanics and Physics in Solids. – 1971. – Vol. 199 – pp. 433–455.
3. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры // П.В. Трусков [и др.] // Физическая Мезомеханика. – 2012. – № 1. – С. 33–56.
4. Bertin N. On the strength of dislocation interactions and their effect on latent hardening in pure Magnesium// International Journal of Plasticity. – 2014. – № 62. – P. 72–92.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ С УНИМОДАЛЬНОЙ И ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ПОРИСТОСТЬЮ ПРИ СЖАТИИ

Григорьев М.В.^{1,2}, Саблина Т.Ю.¹, Севостьянова И.Н.¹, Савченко Н.Л.¹,
Буякова С.П.^{1,2,3}, Кульков С.Н.^{1,2,3}

¹Федеральное государственное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук,

2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,

³Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,

e-mail: grv@ispms.ru

Создание керамики с пространственными, взаимопроникающими структурами, имеющими различную конфигурацию (ячейки, каналы, оболочки и т. п.) является чрезвычайно сложной, но перспективной задачей, поскольку подобные элементы структуры могут обеспечить понижение масштаба разрушения до уровня отдельных элементов структуры и предотвращать образование магистральной трещины.

В работе исследована керамика на основе корунда с двумя типами порового пространства (униmodalной и иерархической) и проведен анализ их деформационного поведения при сжатии.

После спекания керамика с униmodalным распределением пор по размерам имела пористость от 17 до 70 %. С увеличением температуры спекания наблюдалось уменьшение объема порового пространства, а также увеличение среднего размера пор за счет консолидации мелких пор в более крупные.

Керамика с иерархической пористостью после спекания имела пористость от 35 до 60 %. Мелкая пористость между зернами возникала в объеме образца в результате процессов диффузии и рекристаллизации во время спекания и определялась температурой спекания. Частицы СВМПЭ играли роль выгорающих порообразующих добавок, способствующих образованию крупной пористости в спеченных керамических образцах. Средний размер крупных пор составлял около 80–100 мкм, а размер мелких пор составлял в среднем 10–15 мкм. Межгрупповая пористость, возникающая в результате эффекта «зонального обособления» в объеме спеченной керамики, присутствовала в виде поровых каналов, соединяющих большие поры друг с другом и формируя таким образом блочную структуру. Средний размер блоков спеченного материала определялся расстоянием между большими порами и находился в диапазоне от 110 до 120 мкм.

Анализ кривых «напряжение–деформация» пористой корундовой керамики с униmodalной и иерархической пористостью выявил переход от характерного хрупкого разрушения образцов с низкой пористостью, сопровождающихся образованием основной трещины, к созданию множественных очагов разрушения, сформированных микротрещинами в образцах с высокой пористостью.

Показано, что полученная керамика с иерархической поровой структурой при деформации вызывает образование сегментированной деформационной структуры в объеме керамики, что приводит к уменьшению масштаба разрушения от макро уровня в случае униmodalной керамики до микромасштабного разрушения, сравнимого с размерами блоков, образующихся при спекании.

При фиксированных значениях объема порового пространства изученная керамика с иерархической структурой пор имеет заметно более высокие значения предела прочности при сжатии по сравнению с керамикой с униmodalной пористостью.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРОГРАММАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Губин В.В., Анিকেев Н.А., Дьяченко Д.И., Сторожева Е.И.

*АО «ВНИКТИнефтехимоборудование»,
98^б, пр. Ленина, 400078, г. Волгоград, Российская Федерация,
e-mail: gubinvv@vniktinho.ru*

Снижение исходных прочностных характеристик материала стальных элементов и конструкций – одна из важнейших проблем современной промышленности. Неразрушающие методы контроля деградации свойств материала в процессе эксплуатации являются перспективным направлением, так как позволяют своевременно выявить переход элементов в предельное состояние и во многих случаях продлить эксплуатацию оборудования без увеличения риска аварийности.

Основными причинами перехода стальных элементов в предельное состояние являются процессы деградации исходной структуры, вызванные комплексом механических нагрузок, термических воздействий и влияния коррозионно-активных сред. Структурная поврежденность материала приводит, в частности, к явлению увеличения внутреннего трения, проявляющегося при колебаниях малой амплитуды в упругой области [1].

Цель данного исследования – изучение возможности выявления структурных изменений в стали через сравнение спектральных характеристик возбуждаемых резонансных колебаний образцов и выявление наиболее индикативных спектральных параметров.

Эксперимент

Для исследования зависимости спектральных характеристик от структурных изменений материала в качестве образцов были выбраны кольца упорных подшипников из стали ШХ15, разделенные на 2 группы – новые и бывшие длительное время в эксплуатации. Элементы из стали ШХ15 поставляются в состоянии закалки. Для изменения механических свойств и микроструктуры материала образцы подвергались отпуску при температурах от 460 до 560 °С.

Возбуждение колебаний производилось точечным ударным воздействием на образцы. Запись колебаний производилась посредством направленного измерительного микрофона. Ранее были проведены эксперименты по аналогичной методике, позволившие выявить снижение добротности на резонансных частотах в результате эксплуатационной структурной поврежденности материала [2]. В настоящем исследовании для визуализации различий спектральных характеристик образцов до и после термообработки использованы динамические спектрограммы (сонограммы). Сравнение сонограмм облегчает выявление наиболее индикативных параметров, принимаемых в дальнейшую обработку.

Результаты

Микроструктура образцов контролировалась оптическим микроскопом при увеличении $\times 100$ и $\times 1000$. Подтверждена идентичность изменений микроструктуры образцов и снижение твердости в результате термообработки.

Характер изменения спектрограмм после термообработки у всех образцов идентичный. Зарегистрированы сдвиг резонансных частот и снижение декремента затухания основных гармоник. Установлена зависимость указанных изменений от параметров термообработки – температуры и длительности выдержки. Установлено, что влияние термообработки на спектральные характеристики образцов, бывших в эксплуатации, больше, чем на новые.

Полученные результаты соотносятся с данными многолетних исследований колоколов [3], в результате которых обнаружено понижение частот основных обертонов и увеличе-

ние декремента затухания, что связано с накоплением эксплуатационной структурной поврежденности материала.

Выводы

Результаты спектрального анализа возбуждаемых колебаний стальных образцов, подвергаемых термообработке, с применением динамических спектрограмм позволяют сделать вывод об информативности данного подхода и возможности определения индикативных спектральных параметров для оценки структурных изменений материала.

Литература

1. Dreiman N., Fry E. Sound radiation of structural metals at normal and elevated temperatures. International Compressor Engineering Conference, Paper 1260.100 E. Patterson St., Tecumseh, MI 49286, USA. pp. 325–330.
2. [Гольдштейн Р.В.], Нечипоренко П.Р., Попов А.Л., Козинцев В.М., Челюбеев Д.А., Губин В.В. Оценка эксплуатационной поврежденности по излучаемому акустическому полю при ударных испытаниях стальных образцов. Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции «Радиоинфоком–2017». Москва, МИРЭА, 2017, с. 603–609.
3. Климин Е.А. К проблеме мониторинга микротоновых изменений в звучании колоколов. Материалы научной конференции «Колокола: история и современность». Ростов, 2015, с. 92–104.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ В СТЕНКАХ РЕЗЕРВУАРОВ НЕФТЕХРАНИЛИЩ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Гусев Г.Н., Маккавеев А.В., Шардаков И.Н.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
д. 1, ул. Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: gusev.g@icmm.ru*

При проектировании строительных сооружений наиболее важным фактором является безопасность процессов их строительства и дальнейшей эксплуатации. Однако довольно часто на этапе монтажа конструкции в силу разнообразных факторов (в том числе техногенного характера) появляются отклонения от проекта в виде дефектов, которые могут привести к разрушению сооружения и, как следствие, к человеческим жертвам. Решение вопроса о возможности безопасной эксплуатации сооружения на всех этапах жизненного цикла с учетом появившихся дефектов является актуальной научно-технической задачей. Очень часто решение таких задач для каждого конкретного случая имеет свои особенности, сложившиеся из условий и обстоятельств, сопровождавших данный случай.

В работе рассмотрен пример оценки напряженно-деформированного состояния сложной строительной конструкции в виде стального резервуара цилиндрической формы для хранения нефтепродуктов общим объемом 5000 м³. Сложность решаемой задачи заключается в том, что построенная конструкция в результате некачественного монтажа получила ряд существенных дефектов в виде локальной «погиби» стальной стенки резервуара. Общая площадь обшивки с дефектами составила 100 м². Наличие данных дефектов поставило под сомнение надежную и безопасную работу сооружения в последующем под действием всех эксплуатационных нагрузок. Решение задачи о возможности безопасной эксплуатации резервуара определило существо выполненных исследований.

На первом этапе было осуществлено измерение отклонений геометрии оболочки резервуара от проектного варианта с использованием тахеометра. Далее была разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния резервуара с учетом упругого и неупругого поведения материала. Модель позволила учесть информацию об искажении геометрии конструкции, полученную на основе тахеометрических измерений. В качестве внешних факторов были учтены гидростатическое воздействие нефтепродуктов, собственный вес элементов конструкции, температура. На основе результатов численного моделирования была разработана структура последующего эксперимента, определены места регистрации деформаций, выбран необходимый режим нагружения резервуара водой и разгрузки, а также предложен режим тахеометрических измерений.

Анализ общей совокупности полученных теоретических и экспериментальных результатов позволил установить запас прочности конструкции и возможность безопасной эксплуатации нефтехранилища. В процессе исследования было установлено, что существующие отклонения от проектной геометрии оболочки резервуара провоцируют потерю устойчивости (переход из одного равновесного состояния в другое) при заполнении резервуара водой. То обстоятельство, что при таком переходе не возникает необратимых пластических деформаций, в значительной степени определило возможность безопасной эксплуатации сооружения. Для контроля деформационного состояния элементов резервуара была разработана и установлена автоматизированная система мониторинга.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00172).

ОБ ОЦЕНКЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОГРУЖНЫХ СВАЙ МЕТОДАМИ ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ УДАРА

Гусев Г.Н., Маккавеев А.В., Матвеев В.П.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
д. 1, ул. Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: gusev.g@icmm.ru*

Оценка несущей способности, силы предельного сопротивления осевой нагрузке погруженных в грунт свай является одним из основных этапов изысканий и последующего строительства различных инженерных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях. От качества оценки несущей способности отдельных свай и свайных фундаментов в целом зависит эксплуатационная безопасность возводимого на них сооружения, что в свою очередь определяет актуальность решения связанных с такой оценкой задач. В России чаще всего решение задачи об определении несущей способности свай проводится посредством статических полевых испытаний вдавливанием, методика и технология которых хорошо разработаны изначально советскими, а в последующем – усовершенствованы российскими учеными. Статические испытания достаточно трудоемки и занимают длительное время. В западных странах наряду со стандартными статическими испытаниями широкое применение получили методики оценки несущей способности свай, основанные на анализе ее отклика на ударное воздействие молота.

В представленной работе проведен анализ существующих подходов к определению несущей способности свай при статическом и динамическом нагружении. Проведено сравнение методик, применяемых в России и за рубежом.

В частности, рассмотрены активно используемые методики оценки несущей способности свай, используемые в США Министерством транспорта г. Вашингтон и Федеральным управлением шоссейных дорог. Данные методики основаны на зависимостях несущей способности свай от энергии удара молота, описанных в работах А. Веллингтона, М. Гейтса и др. Подобные соотношения являются обобщением как экспериментальных зависимостей, полученных в результате многочисленных опытов, так и решений краевых задач сохранения энергии и количества движения в системе «молот–свая–окружающий грунтовый массив».

К активно развивающимся современным подходам по оценке несущей способности свай относятся методики с использованием уравнений волновой теории удара. Здесь осевые перемещения сваи характеризуются продольными волнами, распространяющимися по длине сваи после ударного взаимодействия с молотом, и являются измеряемыми в ходе эксперимента величинами. Моделирование поведения системы «молот–свая–грунтовое основание» и определение несущей способности осуществляется двумя способами.

Первый – поиск аналитического решения волнового уравнения с заданными условиями взаимодействия сваи и окружающего грунтового массива. Известной является функция перемещений точек сваи в зависимости от времени. Условия взаимодействия сваи с окружающим грунтовым массивом, которые и определяют ее несущую способность, выступают в роли неизвестных, требующих определения.

Второй – поиск численного решения задачи моделирования дискретной многомассовой системы «молот–свая–окружающий грунтовый массив» с теми же исходными данными.

В работе приведены примеры программных продуктов, в которых реализованы описанные выше методы: ZWAVE, ICHWAVE, APEWAVE, CAPWAP и WEAP.

Также в рамках проведенного исследования была создана конечно-элементная математическая модель системы «молот–свая–грунтовое основание» на базе программного комплекса ANSYS 17.2. Численно решен ряд задач определения функций осевых перемещений сваи в зависимости от энергии удара молота для различных параметров окружающего грунтового массива, которые определяют ее несущую способность.

ВЛИЯНИЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Саврай Р.А., Давыдова Н.А., Макаров А.В., Малыгина И.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, 620049, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, 620990, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: ras@imach.uran.ru*

Для повышения эксплуатационных характеристик поверхности металлов и сплавов широко используются методы поверхностного пластического деформирования. В частности, фрикционная обработка скользящим индентором является эффективным способом наноструктурирования поверхностных слоев практически любых металлических материалов, включая высокопрочные и труднодеформируемые сплавы. При упрочнении материалов методами интенсивной поверхностной пластической деформации важной задачей является также оценка прочности, пластичности и способности поверхностного слоя выдерживать контактные нагрузки и сопротивляться разрушению. Для контроля свойств модифицированных поверхностных слоев требуется локальный способ нагружения, который может быть реализован при индентировании. С использованием характеристик, измеряемых непосредственно при индентировании, определяют параметры, по которым оценивают способность поверхностных слоев различных материалов сопротивляться механическому контактному воздействию и, соответственно, выдерживать эксплуатационные нагрузки.

Цель настоящей работы – изучение структуры методом EBSD анализа и микромеханических характеристик отожженной низкоуглеродистой стали 20 (0,17 мас. % C), подвергнутой фрикционной обработке скользящим индентором из твердого сплава.

Установлено, что исходная феррито-перлитная структура отожженной стали 20 характеризуется размером зерен феррита от 2 до 40 мкм при среднем размере около 14 мкм. В результате фрикционной обработки в поверхностном слое стали 20 происходит сильное диспергирование структуры, обусловленное интенсивной деформацией трением. При этом минимальный размер зерен в деформированном слое толщиной 5 мкм составил около 200 нм, что свидетельствует об измельчении структуры вплоть до субмикро- и нанокристаллического состояния. По результатам кинетического микроиндентирования пирамидой Виккерса при различной нагрузке на индентор установлено, что при всех используемых нагрузках наблюдаются пониженные значения контактного модуля упругости E^* стали 20 после фрикционной обработки по сравнению с исходным отожженным состоянием. В частности, при нагрузке на индентор 1 г среднее значение величины E^* снижается от 208 до 168 ГПа, при нагрузке 25 г – от 213 до 176 ГПа, при нагрузке 200 г – от 204 до 155 ГПа. Это может быть обусловлено изменением структурно-фазового состояния и ростом плотности дислокаций в поверхностном слое стали 20 после фрикционной обработки. Для материала, подвергнутого фрикционной обработке, эффект снижения модуля упругости наблюдается впервые. Результаты микроиндентирования также показали, что после фрикционной обработки отношение H_{IT}/E^* возрастает от 0,011 до 0,044 (при нагрузке 1 г), от 0,008 до 0,026 (при нагрузке 25 г), от 0,006 до 0,020 (при нагрузке 200 г); упругое восстановление R_e возрастает от 6,7 до 25,2 % (при нагрузке 1 г), от 6,1 до 18,5 % (при нагрузке 25 г), от 13,5 до 16,4 % (при нагрузке 200 г); степенное отношение H_{IT}^3/E^{*2} возрастает от 0,00028 до 0,01449 ГПа (при нагрузке 1 г), от 0,00009 до 0,00292 ГПа (при нагрузке 25 г), от 0,00005 до 0,00132 ГПа (при нагрузке 200 г). Таким образом, из данных микроиндентирования следует, что фрикционная обработка повышает способность поверхности отожженной стали 20 выдерживать более высокие контактные нагрузки до начала пластического деформирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4.

Макаров А. В. Наноструктурирующая фрикционная обработка углеродистых и низколегированных сталей // Перспективные материалы : учебное пособие / под ред. Д. Л. Мерсона. Том IV. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 434 с.

СПОСОБЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ШВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ

Герасимов А.И., Данзанова Е.В., Ботвин Г.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа СО РАН,
д. 1, Октябрьская, г. Якутск, 677890, Российская Федерация,
e-mail: dhv4071@mail.ru*

Строительство трубопроводов предъявляет повышенные требования к качеству получаемых сварных соединений, эксплуатационная надежность которых должна быть сопоставима с надежностью самих труб. Существует ряд нормативных документов, устанавливающих общие технические требования к контролю качества, правилам приемки и методам испытаний соединений труб между собой и к соединительным деталям. В предлагаемой работе рассматриваются способы исследования прочности материала шва наиболее применяемых в настоящее время методов сварки полимерных труб: сварки нагретым инструментом встык, сварки с закладным нагревательным элементом и сварки нагретым инструментом в раструб. Рассматриваемые способы были разработаны из-за отсутствия в нормативных документах и научных работах, посвященных исследованию сварных соединений полимерных труб, простых методов количественной оценки прочности материала сварного шва, необходимых для исследования эффективности разрабатываемых технологий сварки полимерных труб при низких температурах на открытых площадках. Возможности предлагаемых способов определения прочности по шву весьма обширны, например, можно использовать для оценки влияния изменения параметров сварки на прочность соединения, а также для оценки прочности по периметру сварки, в случае раструбной сварки – по зонам сварного соединения. Эти же способы можно использовать для квалификационных испытаний сварщиков.

Цель работы – количественная оценка прочности материала сварных стыковых, муфтовых и раструбных соединений полимерных труб.

При использовании разработанной методики испытаний сварных стыковых соединений было установлено, что в допустимом интервале температур производства сварных работ наименьшая прочность получается при $T = 43$ °С. Результаты раструбных сварных соединений показали, что наиболее прочной зоной является наружная область. Кроме того, полученные результаты испытаний по предлагаемым методикам показали эффективность разработанных в ИПНГ СО РАН технологий сварки полимерных труб в условиях низких климатических температур на открытом воздухе без использования временных отапливаемых конструкций.

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА, ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩЕГО В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ. КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ

Данилов В.И.¹, Смирнов А.Н.², Абабков В.Н.², Горбатенко В.В.¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, Академический пр., г. Томск, 634055, Российская Федерация,

²Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
33, к. 2, пр. Ленина, г. Кемерово, 650055, Российская Федерация,
e-mail: n.ababkov@rambler.ru, dvi@ispms.tsc.ru

Представлены результаты анализа структурно-фазового состояния и характера локализации пластической деформации металла теплоэнергетического оборудования после длительной эксплуатации. Исследовались образцы стали 20, вырезанные изгиба водоотпускной трубы фронтального экрана котла ТЭЦ, которая разрушилась после эксплуатации в течение 219 тыс. ч.

Установлено, что изменилась структура и механические свойства материала. По сравнению с исходным состоянием средний размер ферритных зерен увеличился по отношению к исходному состоянию в четыре и в два раза соответственно. Морфологические особенности состоят в том, что на фоне темной перлитной составляющей, окруженной сеткой из полиэдрических зерен феррита, хорошо видны иглы, видманштеттового феррита, расположенные внутри перлитных колоний параллельно друг другу. Доля видманштеттового феррита в структуре стали составила ~ 23 % от всего объема ферритной составляющей. Произошла трансформация диаграммы растяжения, на которой после эксплуатации отсутствует площадка текучести. Пластичность стали после эксплуатации уменьшилась в два раза, а прочность существенно не изменилась.

Наибольшие изменения произошли в характере локализации деформации материала при одноосном растяжении. Методом DIC (digital image correlation) обнаружено, что на начальном этапе нагружения в эксплуатирувавшем металле не происходит формирования подвижных фронтов локализованной деформации, связанных с распространением полос Чернова–Людерса, зато задолго до появления видимой шейки разрушения появляется устойчивая зона локализации макродеформации. Положение такой зоны совпадает с местом, где в дальнейшем происходит разрушение. Время появления устойчивой зоны локализации макродеформации коррелирует с общим временем растяжения образца до разрушения. Соотношение этих времен характеризует ресурс израсходованной пластичности материала до разрушения и может быть в перспективе использовано для разработки деформационного критерия для диагностики состояния теплоэнергетического оборудования.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук России на 2013–2020 гг. При выполнении экспериментальных исследований использовалось научное оборудование Центра коллективного пользования «Нанотех» при ИФПМ СО РАН.

ВЛИЯНИЕ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ТРУБНОЙ СТАЛИ ПРИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ (ТМСР)

Краснов М.Л.¹, Платов С.И.², Урцев В.Н.³, Данилов С.В.⁴,
Пастухов В.И.^{4,5}, Лобанов М.Л.⁴

¹ПАО «ММК», д. 93, ул. Кирова, г. Магнитогорск, 455000, Российская Федерация,

²МГТУ им. Г.И. Носова., д. 38, пр. Ленина, г. Магнитогорск, 455000, Российская Федерация,

³ИТЦ «Аусферр», д. 18, ул. Горького, г. Магнитогорск, 455000, Российская Федерация,

⁴УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,

д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,

⁵АО «Институт реакторных материалов», а/я 29, г. Заречный, 624250, Российская Федерация,
e-mail: s.v.danilov@bk.ru

Прорывное улучшение конструктивной прочности низколегированных трубных сталей от классов прочности X52-X65 к K60-K65 и выше к K80 произошло в середине 70-х гг. 20-го в. в связи с разработкой и внедрением в промышленное производство контролируемой термомеханической обработки (ТМСР – Thermo-Mechanical Controlled Processing), сочетающей в себе контролируемую прокатку и последующее ускоренное контролируемое охлаждение [1, 2]. Промышленное применение ТМСР в России вышло на новый уровень в 21-м в. с запуском специализированных прокатных станов 5000 на ПАО «Северсталь», ПАО «ВМЗ» и ПАО «ММК» (г. Магнитогорск).

Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей формирования структуры малоуглеродистой низколегированной стали типа 06Г2МБ при ускоренном охлаждении, в процессе которого реализуется γ - α -сдвиговое превращение.

Скорости охлаждения образцов, воспроизводящие технологические параметры промышленной обработки (50–700 °C/c), моделировались на оригинальном стенде, разработанном ИТЦ «Аусферр». В качестве основного метода исследования использовалась сканирующая электронная микроскопия с применением ориентационного анализа (EBSD).

При скоростях охлаждения 50–450 °C/c γ - α -превращение начинается при температурах 700–670 °C и происходит по сдвиговому механизму. В результате формируется преимущественно бейнитная структура с включениями мартенситных областей. С увеличением скорости охлаждения величина зерен бейнита уменьшается, а размеры и объемная доля мартенситных включений возрастает. При скоростях охлаждения выше 600 °C/c в стали формируется исключительно структура реечного мартенсита.

Установлено, что структура, сформированная в результате ТМСР, при дальнейшей ее термической обработке обладает текстурной наследственностью. Она состоит в том, что при обработке стали, включающей фазовую перекристаллизацию $\alpha_{\text{ТМСР}} \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha_{\text{ТО}}$, в структуре воспроизводится текстура ТМСР. Показано, что носителями текстурной наследственности являются специальные границы, близкие к РСУ-границам У3 и У11 [3].

Литература

1. Zhao M.-Ch., Yang K., Shan Y. The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel // Materials Science and Engineering A. – 2002. – V. 335. – P. 14–20.
2. Влияние кристаллографической текстуры бейнита на разрушение листов трубных сталей, полученных контролируемой термомеханической обработкой / И. Ю. Пышминцев, А. О. Струин, А. М. Гервасьев и др. // Металлург. – 2016. – № 4. – С. 57–63.
3. Текстурная наследственность при фазовых превращениях в малоуглеродистой низколегированной трубной стали после контролируемой термомеханической обработки / М. Л. Лобанов, М. Д. Бородина, С. В. Данилов и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 11. – С. 910–918.

УНИКАЛЬНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ СПЛАВОМ Fe-Ni С НОВЫМИ ФАЗАМИ

Жихарева И.Г., Денисенко Д.В., Шмидт В.В., Смирнова Н.В.

Тюменский индустриальный университет, д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: ardiasardias@gmail.com

Современная техника требует новых технологий и материалов с уникальными эксплуатационными свойствами. Наиболее перспективным решением этой глобальной задачи является разработка наноструктурных материалов с новыми фазами. Для железа и его сплавов такой фазой является гексагональная плотноупакованная (ГПУ) фаза (ϵ -Fe). Интерес к ней вызван ценными свойствами (высокая электропроводность, твердость, необычные магнитные свойства). Но несмотря на различные способы получения ϵ -фазы, на данный момент технология ее получения не разработана, что связано с неустойчивостью гексагональной плотноупакованной (ГПУ) фазой и сложными условиями ее получения ($P \geq 11,3$ ГПа, $T \geq 300 - 1000$ К).

Авторами [1, 2] методом высокочастотного переменного тока (ВПТ) впервые получена устойчивая экзотическая фаза ϵ -Fe для сплавов Fe-Ni и Fe-Ni-Cr при стандартных условиях ($p = 0,1$ МПа, $T = 298$ К) из водных растворов простых солей.

Цель работы – получение покрытия сплавом Fe-Ni с новыми фазами и определение его возможных эксплуатационных свойств.

В качестве метода получения предложен ВПТ. Получено покрытие сплавом Fe-Ni, содержащее наряду с основной объемноцентрированной кубической (ОЦК) α -фазой (феррит) две новые фазы: ГПУ-эпсилон-Fe и интерметаллид $FeNi_3$.

Установлено, что ϵ -фаза формируется только в результате фазового перехода α -Fe \rightarrow ϵ -Fe; ϵ -фаза имеет наноструктурное строение. ϵ -фаза устойчива в рабочем интервале температур от +400 до -90 °С. Фаза эпсилон железа обладает плотностью $10,24$ г/см³, что согласуется с данными Банкрофта и на 31 % больше, чем у α -Fe.

Показано, что покрытия Fe-Ni, содержащие более 80 % железа, являются двухфазными (α -Fe + ϵ -Fe), а сплав с содержанием 68 % железа обладает тремя фазами (α -Fe, интерметаллид $FeNi_3$ и ϵ -Fe). Следует отметить, что при стационарных условиях осаждения интерметаллид $FeNi_3$ не образуется. Эта фаза получена только для литых сплавов. Методом атомно-силовой микроскопии показано, что гексагональная плотноупакованная ϵ -фаза состоит из большого количества нанопластин, каждая из которых имеет толщину 10 нм.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что покрытия сплавом Fe-Ni (ϵ -фаза) не окисляются на воздухе и сохраняют химический и фазовый состав без изменения (ряд наших образцов сохраняют их в течение 4 лет).

Присутствие эпсилон фазы в сплаве Fe-Ni обеспечивает высокую хладостойкость (до -90 °С). С другой стороны, фаза $FeNi_3$ также является хладостойкой, что позволяет рекомендовать покрытия Fe-Ni (ϵ) и ($\epsilon + FeNi_3$) для защиты газо- и нефтедобывающего оборудования работающего в условиях Арктики. Установлено, что присутствие ϵ -Fe в сплаве обеспечивает повышение коррозионной стойкости более чем в 7 раз по сравнению с высоколегированной сталью 20X23H18. Высокая микротвердость покрытий сплавом FeNi (1600 HV) позволяет рекомендовать их как конструкционные материалы (высотные дома, мосты, подземные сооружения, туннели и др.).

В целом по качеству и областям применения покрытия, содержащие ϵ -фазу (или ϵ -Fe + $FeNi_3$), – материалы будущего.

Литература

1. Iron and Fe–Ni alloy coatings containing e-Fe produced by non-stationary deposition method / I. Zhikhareva, N. Smirnova, V. Schmidt, O. Vorobyev // AIP Conf. Proc. – 2016. – Vol. 1767. – P. 020020-1–020020-4.
2. Improving producing characteristics of constructions through Fe-Ni and Fe-Ni-Cr alloy coatings with a given structure / I. Zhikhareva, N. Smirnova, V. Schmidt, O. Vorobyev // Solid State Phenomena. – 2016. – Vol. 871. –P. 16–21.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛА ОЦК-ЖЕЛЕЗА В УСЛОВИЯХ СДВИГОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Дмитриев А.И., Никонов А.Ю.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: dmitr@ispms.ru*

Требования, предъявляемые к современным фрикционным материалам, сочетают в себе комплекс параметров, обеспечение которых материалом с простой структурой часто становится невозможным. В этой связи все большую популярность приобретают композиционные фрикционные материалы, в которых каждый из составных элементов композиционной смеси несет свою функциональную нагрузку и способен обеспечить те или иные фрикционные свойства материала в целом. Это в равной степени относится как к металлическим, так и неметаллическим включениям и матрице. Фундаментальный научный интерес заключается в изучении поведения таких материалов в условиях сдвигового нагружения. Самостоятельной задачей является изучение влияния структуры фрикционного материала на особенности его пластического деформирования. Хорошо известно, что свойства материалов в нанокристаллическом состоянии существенно отличаются от материала, характеризующегося большим размером зерен. Исходя из вышесказанного, в настоящей работе были проведены исследования, включающие численное тестирование механического отклика металлического кристаллита, находящегося в моно- и нанокристаллическом состоянии и представляющего традиционный материал частиц включений фрикционных композитов на металлической основе.

Для достижения поставленной цели в работе с использованием метода молекулярной динамики было проведено исследование поведения кристаллической ОЦК-решетки железа в условиях сдвигового нагружения. Взаимодействие между атомами описывали в рамках модифицированного метода погруженного атома; анализировали силы сопротивления движению нагружаемых слоев и динамика изменения кристаллической структуры образца; исследовали два типа состояний: монокристалл α -железа и наноразмерный поликристаллический образец, состоящий из нескольких зерен α -железа. В работе были выявлены особенности развития пластической деформации в зависимости от типа структуры нагружаемого кристаллита. В частности, пластическая деформация в наноразмерном поликристалле реализуется в том числе за счет движения границ зерен, что приводит к росту одних и уменьшению в размерах других зерен. С другой стороны в монокристалле деформация преимущественно развивается путем формирования дефектов структуры кристаллической решетки. Проанализированы силы сопротивления относительному проскальзыванию в обоих из рассмотренных случаев.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., Проект III.23.2.4.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ
У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В ЛИНЕЙНО УПРУГОМ ИЗОТРОПНОМ МАТЕРИАЛЕ:
МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ
М. УИЛЬЯМСА С УЧЕТОМ ВЫСШИХ ПРИБЛИЖЕНИЙ**

Долгих В.С., Степанова Л.В.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
34., Московское шоссе, Самара, 443086, Российская Федерация,
e-mail: vadek13@ramler.ru, stepanovalarisa2015@yandex.ru*

В последние годы в механике разрушения сложилось четкое и ясное понимание необходимости удержания высших приближений в асимптотическом представлении поля напряжений у вершины трещины [1–3], коэффициенты которого зависят от геометрии образца и системы приложенных нагрузок и могут быть определены 1) теоретическими методами, 2) экспериментальным подходом и 3) путем вычислительного эксперимента. Теоретическое определение коэффициентов асимптотического разложения М. Уильямса может быть выполнено только для тел с простой геометрией. Поэтому сейчас особое внимание уделяется экспериментальным методам и вычислительному эксперименту [1–4]. В настоящей работе выполнена целая серия экспериментальных исследований методом фотоупругости для образцов с трещинами и надрезами с целью вычисления коэффициентов интенсивности напряжений для нормального отрыва и поперечного сдвига, T -напряжений и коэффициентов высших приближений. Корректная интерпретация интерференционных картин, получаемых с помощью поляризационно-оптических методов, вызывает значительные трудности [1, 4]. Поэтому в рамках работы проведена цифровая обработка данных эксперимента на фотоупругость для определения напряженного состояния в целой серии экспериментальных образцов с концентраторами напряжений: трещинами и надрезами (пластина с одной горизонтальной и наклонной трещинами, пластина с двумя боковыми надрезами, полукруглый образец с вертикальным и наклонным надрезом). В настоящей работе также выполнен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния пластины с центральной трещиной, направленный на определение масштабных (амплитудных) множителей полного асимптотического разложения М. Уильямса. Разработан и приведен эффективный способ обработки всей совокупности экспериментальной информации и алгоритм вычисления не только T -напряжений, но и коэффициентов высших приближений в асимптотических разложениях компонент тензора напряжений. В конечно-элементном пакете Simulia Abaqus выполнено построение различных расчетных сеток для определения коэффициентов интенсивности напряжений, T -напряжений. Численное решение задачи использовано для определения коэффициентов высших приближений. Проведено сравнение коэффициентов, полученных экспериментальными методами механики твердого тела, с оценками коэффициентов, найденными с помощью метода конечных элементов. Показано хорошее соответствие между картиной распределения напряжений, полученной путем применения конечно-элементного пакета Simulia Abaqus, и теоретически реконструированными картинками линий равных значений разности главных напряжений.

Показано, что правильная интерпретация экспериментальных данных требует удержания в полном асимптотическом разложении М. Уильямса поля напряжений высших приближений: чем дальше экспериментальная точка лежит от кончика трещины, тем больше слагаемых следует удерживать в асимптотическом разложении.

Литература

1. Степанова Л. В., Долгих В. С. Цифровая обработка результатов оптоэлектронных измерений: метод фотоупругости и его применение для определения коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса поля напряжений на примере смешанного деформирования пластины с двумя коллинеарными трещинами // Вестник Самарского технического университета. Серия: физико-математическая. – 2017. – Т. 21, № 3–4. – С. 717–735.
2. Fakhri M., Haghghat Kharrazi, Aliha M. R. M. Mixed-mode tensile – In plane shear fracture energy determination for hot mix asphalt mixtures under intermediate temperature conditions// Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – Vol. 192. – P. 98–113.
3. Mirsayar M. M., Razmi A., Berto F. Tangential strain-based criteria for mixed-mode I/II fracture toughness of cement concrete // Fatigue Fracture Engineering Materials Structure. – 2017. – P. 1–9.
4. Разумовский И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 240 с.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В РЕЗЕРВУАРЕ ПРИ ОСАДКЕ ОСНОВАНИЯ

Рейзмунт Е.М., Доронин С.В.

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал,
53, пр. Мира, г. Красноярск, 660049, Российская Федерация,
e-mail: e.sigova@gmail.com, mr.svdoronin@yandex.ru*

Резервуары вертикальные стальные (РВС) широко используются в различных отраслях промышленности для хранения жидкостей и газов бытового и промышленного назначения. Их изготавливают номинальным объемом от 100 до 120 000 м³. Резервуары, предназначенные для хранения больших объемов нефтепродуктов, сжиженных газов, химических продуктов, относятся к опасным объектам. Несмотря на достигнутый в последние годы прогресс в резервуаростроении, в процессе эксплуатации продолжают происходить аварии резервуаров, при этом разрушаются не только отдельные их элементы, но иногда и вся конструкция, повреждая стоящие рядом резервуары, инфраструктуру, строительную технику и другие объекты. Истечение из резервуара таких продуктов хранения как нефть, нефтепродукт, химический продукт, горячая вода и др., приводит к разрушениям, материальным потерям, экологическим бедствиям, а порой и к человеческим жертвам.

Одной из причин аварийных ситуаций при хранении нефтепродуктов нередко является осадка основания резервуара. Она связана со сжатием грунта под действием силы тяжести от веса конструкции резервуара и хранимого в нем продукта. Осадка основания может происходить как равномерно, так и неравномерно. Наиболее опасна неравномерная осадка.

Цель работы – разработка и апробация вычислительной модели накопления повреждений в резервуаре при неравномерной осадке основания. Геометрическая модель РВС представляет собой цилиндрическую оболочку с плоским днищем и подкрепляющим уголком на верхнем контуре. В качестве нагрузок рассматриваются собственный вес и гидростатическое давление от налитой жидкости. Деформация грунтов моделируется упругим основанием, разбитым на зоны с различными коэффициентами жесткости упругого основания (постели).

Предложены три подхода к моделированию основания РВС, соответствующие различным сценариям его осадки. В первой модели основание разбивают на параллельные полосы, коэффициенты постели ступенчато уменьшаются от центра основания к контуру. Во второй модели основание разбивают на радиальные полосы, осадка основания наибольшего значения достигает около стенок и наименьшего – в центре. Для третьей модели также характерно радиальное разбиение, однако центр смещен относительно центра резервуара, при этом жесткость основания уменьшается к центру разбиения.

В результате неравномерной жесткости основания в корпусе и днище резервуара развиваются значительные напряжения, которые приводят к изменению формы цилиндрической оболочки и плоского днища с образованием выпучин и вмятин. По результатам расчетов анализируются поля напряжений и абсолютных деформаций в резервуаре, а также отслеживается накопление пластических деформаций с контролем возможной потери устойчивости.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ СПЛАВА 1420, ПОЛУЧЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ

Дроздов В.О., Оришич А.М., Маликов А.Г., Карпов Е.В.,
Павлов Н.А., Месензова И.С.

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
4/1, ул. Институтская, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация,
e-mail: drozdov@itam.nsc.ru*

В авиакосмической отрасли существует серьезная проблема избыточной массы, высокой стоимости и трудоемкости процесса изготовления конструкций, использующих заклепки в качестве соединительных элементов. Одним из решений которой является отказ от клепанных соединений в пользу сварных швов. Лазерная сварка является одним из перспективнейших способов создания неразъемных соединений и обладает рядом преимуществ, по сравнению с другими видами сварки, таких как малая ширина шва, узкая зона термического влияния, малая деформация деталей, высокая скорость процесса, низкая теплоотдача, высокая гибкость и возможность достижения высокой степени автоматизации. Благодаря этому можно сваривать конструкции различной формы и в разных пространственных положениях.

Однако сварные соединения современных высокопрочных сплавов систем Al-Li имеют низкие механические свойства. Прочность сварного соединения на разрыв составляет 0,6–0,85 от прочности основного материала. Но при этом не учитывается, что данные сплавы являются термически и механически упрочняемыми. В настоящей работе впервые проведено комплексное исследование и оптимизация режимов термической обработки неразъемных соединений алюминиевого сплава 1420 системы Al-Mg-Li, полученных при помощи лазерной сварки, для достижения механических свойств на уровне основного сплава или выше.

Результаты исследований показывают, что при застывании расплава сварного шва для формируемого твердого раствора характерна значительная гетерогенность. Твердый раствор в сварном соединении находится в двухфазной области б Al+S1 фаза. Закалка при температурах нагрева 320–450 °С не приводит к существенному растворению этих фаз, а наоборот, обуславливает появление значительной гетерогенности в окружающем шов основном сплаве, т. е. формировании большого количества $S_1(Al_2MgLi)$ фазы. И только закалка при температурах 490–530 °С позволяет достичь как растворение S_1 фазы в основном сплаве, так и неформирование ее в сварочном шве. Испытание на разрыв показало существенное влияние закалки при изменении температуры в интервале 320–530 °С на пластичность (относительное удлинение изменилось в 4 раза), но закалка слабо повлияла на абсолютные значения прочности σ_b , которые изменялась в пределах 340–360 МПа. Важно результатом, является экспериментально наблюдаемый факт значительного упрочнения образцов после процесса старения.

Таким образом, полная термическая обработка позволила увеличить прочность сварного шва в 1.5 раза, приблизив ее к табличной прочности сплава 1420 системы Al-Mg-Li, и значительно превысить прочность сплава в состоянии поставки с завода. При этом относительное удлинение снизилось при старении в 3 раза. Этот результат доказывает перспективность комплексного подхода, включающего лазерную сварку и термическую обработку, для получения деталей с неразъемными соединениями из сплава 1420 с механическими характеристиками, не уступающими основному сплаву.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Дроздов В.О., Черепанов А.Н., Чесноков А.Е., Смирнов А.В.

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
4/1, ул. Институтская, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация,
e-mail: drozdov@itam.nsc.ru*

В последние годы большое внимание уделяется новой технологии модифицирования металлов и сплавов с помощью специально подготовленных нанодисперсных порошков тугоплавких соединений [1–3]. Тугоплавкие наночастицы в малых пропорциях (до 0,1 % от массы исходного металла) вводятся в расплав, как при литье, так и при сварке и показывают свою эффективность по улучшению качества конечного продукта. В процессе непрерывного охлаждения они фактически являются дополнительными центрами кристаллизации, способствуя формированию мелкодисперсной глобулярной структуры сплава. Исходные наночастицы имеют низкую смачиваемость расплавом, вследствие чего не могут быть эффективными центрами кристаллизации. Увеличить смачиваемость, а тем самым повысить эффективность центров кристаллизации, возможно при вводе в расплав плакированных частиц, состоящих из наночастиц тугоплавкого материала и металла-связки, выполняющего роль протектора. Традиционное получение плакированных частиц может быть осуществлено следующими способами: 1) механическим – в высокоэнергетических мельницах планетарного типа; 2) экструдированием – через фильеру в металлической оболочке в виде ленты или прутка; 3) прессованием в специальных пресс-формах. Однако основным недостатком этих способов является неравномерность распределения наночастиц в объеме металла-связки, а также наличие газа, содержащего кислород в конечном продукте.

Цель работы – экспериментальное исследование нового способа плакирования частиц путем предварительного механического смешивания частиц тугоплавкого материала (TiN) с частицами связующего металла (Ti) с последующим получением порошковых гранул, содержащих 20 массовых долей исходных порошковых частиц нитрида титана, и дальнейшей их обработки в аргон-гелиевой плазменной струе в контролируемой атмосфере. В результате был получен композиционный порошок, состоящий из сферических частиц дисперсностью от 0,1 до 80 мкм, в которых тугоплавкие наночастицы нитрида титана равномерно распределены по всему объему металла-связки (титан) и полностью им плакированы. Изучена морфология поверхности, внутренняя структура частиц, представлены результаты рентгенофазового анализа, построена карта распределения элементов, как по поверхности, так и по объему полученной композиционной частицы. Данный способ получения модифицированных частиц повышает прежде всего однородность распределения тугоплавких элементов при вводе в расплав модифицированной частицы, а также увеличивает их смачиваемость, что будет положительно влиять на эффективность модифицирования.

Литература

1. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами / В. П. Сабуров, Е. Н. Еремин, А. Н. Черепанов, Г. Н. Миннеханов. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2002. – 212 с.
2. Нанопорошковые технологии в машиностроении / В. В. Москвичев, Г. Г. Крушенко, А. Е. Буров и др. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 213.– 186 с.
3. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке металлов и сплавов / А. М. Оришич, А. Н. Черепанов, В. П. Шапеев, Н. Б. Пугачева. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. – 252 с.

О СВАРКЕ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ

Черепанов А.Н., Дроздов В.О., Оришич А.М., Маликов А.Г.

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
4/1, ул. Институтская, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация,
e-mail: drozdov@itam.nsc.ru*

Сплавы на основе алюминия и титана являются важнейшими конструкционными материалами в современном машиностроении. Они характеризуются высокими значениями удельной прочности и коррозионной стойкости, в силу чего находят широкое применение в космической, авиационной и автомобильной технике. Детали и конструкции, изготовленные с комбинированным использованием титана и алюминия, сочетают в себе легкость и прочность. Поэтому они используются для изготовления деталей и механизмов, от которых требуются повышенные эксплуатационные свойства. Перспективным способом изготовления таких деталей, является лазерная сварка. Она обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами сварки (высокая скорость, возможность достижения высокой степени автоматизации, малая деформация деталей и гибкость процесса), благодаря чему можно сваривать конструкции различной формы и в разных пространственных положениях. Однако несмотря на многочисленные исследования в области сварки разнородных металлов методами проката, трения и взрыва, проблема лазерной сварки сплавов на основе титана и алюминия все еще мало изучена. Трудности во многом связаны с тем, что титан и алюминий – это металлы, имеющие весьма различные физико-химические и механические свойства. При сварке с проплавлением вследствие большой скорости образования химических соединений между металлами приводят к получению хрупких интерметаллических соединений типа $TiAl_3$ в зоне сварного соединения.

В данной работе было реализовано технологическое решение, уже показавшее свою эффективность при сварке титана со сталью, а именно – использование промежуточной композитной вставки [1, 2]. Было выполнено экспериментальное исследование получения неразъемного соединения с помощью лазерного луча сплава алюминия AD1 с титаном BT1-0 с использованием бинарной композитной вставки AD1 – BT1-0, полученной сваркой взрывом. Исследовано влияние дополнительных технологических приемов, таких как модифицирование сварного шва нанопорошками тугоплавких соединений и механические деформации на прочность неразъемного соединения. При испытаниях на разрыв разрушение происходило по менее прочному материалу – алюминию. Было установлено, что применение наномодифицирования и пластической деформации повышает прочность на разрыв полученного соединения, значение которого достигает 95 % от прочности исходного алюминиевого сплава.

Литература

1. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке сплавов / А. М. Оришич, А. Н. Черепанов, В. П. Шапеев, Н. Б. Пугачева. – Новосибирск : Сибирское научное издание, 2014. – 252 с. – ISBN078-5-7782-2761-3.
2. Laser welding of stainless steel to titanium using explosively welded composite inserts / A. N. Cherepanov, V. I. Mali, Yu. N. Maliutina, A. M. Orishich, A. G. Malikov, V. O. Drozdov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 90, iss. 9. – P. 3037–3043.

ДВЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРОУПРУГОГО СТЕРЖНЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Ватульян А.О., Дударев В.В., Недин Р.Д.

*Южный федеральный университет, д. 8 а, ул. Мильчакова, Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация,
Южный математический институт, д. 22, ул. Маркуса, Владикавказ, 362027, Российская Федерация,
e-mail: vatulyan@math.rsu.ru, dudarev_vv@mail.ru, rdn90@bk.ru*

С помощью метода наложения малых деформаций на конечные и метод линеаризации сформулирована общая постановка задачи о движении электроупругого тела при наличии неоднородного предварительного напряженно-деформированного состояния [1]. Сформулированы вариационный принцип и слабая постановка для различных представлений энергии. На их основе описана задача об установившихся продольных колебаниях консольно-закрепленного электроупругого стержня с различными граничными условиями. Предварительное напряженно-деформированное состояние считается одноосным. В качестве конкретных примеров рассмотрены две задачи. В рамках первой задачи колебания вызываются периодической сосредоточенной силой, приложенной на свободном конце; электроды на торцах закорочены. Модуль Юнга считается переменным по продольной координате. Постановка задачи представлена в виде канонической системы двух уравнений первого порядка с соответствующими краевыми условиями. Решение этой системы получено численно с помощью метода пристрелки. Дана оценка точности построенной численной схемы для частного случая путем сравнения с известным аналитическим решением для однородного стержня.

В рамках второй задачи колебания вызываются путем периодической подачи разности потенциалов на электроды, расположенные на торцах стержня. С учетом структуры дифференциального уравнения движения и определяющих соотношений, решение задачи сведено к исследованию интегрального уравнения Фредгольма второго рода. Решение этого уравнения в общем случае неоднородности предварительного напряженно-деформированного состояния получено численно с помощью метода коллокации. Также по аналогии с первой задачей решение получено путем сведения к канонической системе дифференциальных уравнений первого порядка и последующим использованием метода пристрелки. Проведено сравнение этих двух численных решений.

Для обеих задач построены амплитудно-частотные характеристики для различных законов неоднородности и уровня предварительного напряженно-деформированного состояния. Проведен анализ влияния преднапряжений на значения резонансных частот. На основе этого анализа сформулирована обратная задача диагностики уровня преднапряжений по данным об изменении собственных частот продольных колебаний электроупругого стержня. Для ее решения рассмотрены две задачи о свободных колебаниях стержня при наличии и отсутствии преднапряжений. На их основе получена формула, связывающая значения свободных частот колебаний с формой колебаний стержня свободного от предварительных напряжений и законами изменения преднапряжений. С использованием этой формулы, проведены численные эксперименты по восстановлению уровня преднапряжений по данным о собственной частоте колебаний. Дана оценка точности полученных результатов и практические рекомендации по ее применению.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-3179.2017.1, РФФИ (проект № 16-01-00354).

Ватульян А. О., Дударев В. В., Недин Р. Д. К моделированию и идентификации параметров остаточного напряженного состояния в электроупругих телах // Труды межд. конф. «Актуальные проблемы механики сплошной среды», Армения, Цахкадзор, 2017. – Ереван : НУАСА, 2017. – С. 53–54.

CRYSTAL PLASTICITY SIMULATIONS OF TITANIUM SINGLE CRYSTAL DEFORMATION BEHAVIOR

Emelianova E.S.^{1,2}, Romanova V.A.², Balokhonov R.R.², Sergeev M.V.^{1,2}

¹National Research Tomsk State University, pr. Lenina 36, 634050 Tomsk, Russian Federation,

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,
pr. Akademicheskii 2/4, 634055, Tomsk Russian Federation,
e-mail: emelianova_es13@mail.ru

The deformation behavior of materials is known to be strongly dependent on the material microstructure. One of the promising approaches to modeling the material deformation behavior under loading involves the material microstructure in an explicit form. In this way, the deformation mechanisms on the micro- and mesoscales are taken into account, and the macroscopic response is determined by averaging the deformation response over smaller scales.

The key problem of the numerical simulation in the framework of the microstructure-based approach is the development of constitutive models that realistically describe the deformation behavior of microstructural elements. Polycrystalline metals and alloys are commonly considered as conglomerates of single crystals characterized by different crystallographic orientations relative to the load axis. In this paper a constitutive model for titanium single crystals has been developed and implemented in finite element (FE) calculations.

The elastic and plastic properties of titanium single crystals significantly depend on the crystallographic directions which is a characteristic feature of hexagonal metals. To take into account the elastic and plastic anisotropy on the grain scale, the constitutive equations for titanium single crystals were written in the form of generalized Hooke's law and the plastic response was described within crystal plasticity (CP) theory. The use of CP-based models is fundamentally important for materials with limited set of slip systems.

FE test calculations for titanium single crystals with different crystallographic orientations relative to tensile axis were performed using ABAQUS/Explicit. The calculation results were shown to agree with analytical estimations based on Schmid's law.

Support of the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 17-08-00643) is gratefully acknowledged.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИЗАЙНА ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ И КЕРАМИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

Балохонов Р.Р.¹, Романова В.А.¹, Кульков С.Н.¹, Шваб Е.А.¹,
Емельянова Е.С.^{1,2}, Сергеев М.В.^{1,2}, Батухтина Е.Е.¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический 2/4, 634055, Томск, Российская Федерация,

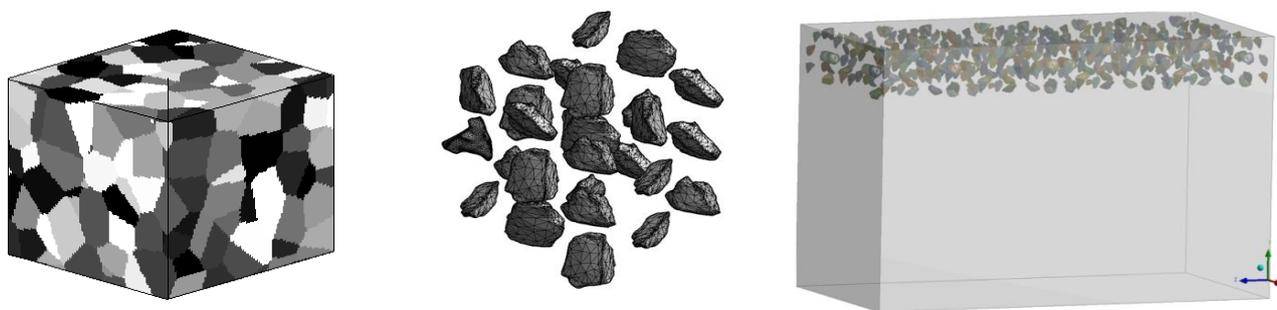
²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
пр. Ленина 36, 634050, Томск, Российская Федерация,
e-mail: emelyanova_es13@mail.ru

Развиты, численно реализованы и адаптированы в существующие коммерческие пакеты прикладных программ (АБАКУС, АНСИС) следующие три метода генерации структур поликристаллов, дисперсно-упрочненных композиций, а также металлокерамических композитов и материалов с покрытиями.

1. Метод пошагового заполнения необходим для генерации как структур композиционных материалов, так и поликристаллической структуры металлической матрицы, и основан на последовательном заполнении расчетной области, дискретизированной регулярной сеткой, структурными элементами (зернами, включениями) в соответствии с заданными геометрическими законами.

2. Алгоритм генерации поликристаллических структур металлических матриц аналитическим методом многоугольников Вороного основан на том, что поликристаллическая структура, границы зерен которой получены пересечением плоскостей Вороного (плоскость, перпендикулярная отрезку и проходящая через его центр), является единственной для заданного распределения центров зарождения.

3. Метод видеофиксации геометрии поверхности реальных объектов основан на предположении о масштабной инвариантности процесса механического дробления и общности природных механизмов сколов твердых горных пород и керамических материалов.



Структуры композиционных материалов

При использовании разработанных методик и экспериментальных данных созданы модельные поликристаллические структуры металлов и сплавов, используемых в качестве подложки при нанесении покрытий, металлокерамических композитов и материалов с композитным покрытием (рисунок). Структуры композитов будут использованы в дальнейшем для изучения процессов локализации деформации и разрушения, связанных с наличием границ раздела в материалах с металлокерамическими композитными покрытиями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00273).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В АСЕЙСМИЧНЫХ И СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНАХ

Еремин М.О.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, Томск, 634021, Российская Федерация,
e-mail: eremin@ispms.tsc.ru*

Как известно, деформации, происходящие в земной коре и вызванные различными факторами, как природного, так и техногенного характера, часто приводят к катастрофическим разрушениям наземных объектов бытового, промышленного и военного назначения. Проблема катастрофических деформаций элементов земной коры является большим вызовом во взаимодействии человека и природы.

Основная цель работы – выявление пространственно-временных неоднородностей деформационных процессов в земной коре, включая прежде всего катастрофические стадии деформационных процессов, приводящие к негативным последствиям, путем математического моделирования механического поведения геологических сред в поле приложенных воздействий. В развиваемой математической модели учтены гравитационные силы, региональное поле напряжений, особенности геологического строения, а также неоднородное развитие деформационных процессов в нагруженной геосреде, как в пространстве, так и во времени.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- построение математической модели, описывающей особенности и закономерности деформации и разрушения, в том числе пространственно-временные неоднородности деформационных процессов в элементах земной коры;
- построение структурных моделей основных объектов исследования, учет особенностей геологического строения, а также наличия разломов с различной степенью активности;
- моделирование эволюции напряженно-деформированного состояния нагруженной геологической среды для условий асейсмичного и сейсмоактивного регионов;
- изучение особенностей переходов деформационных процессов от квазистационарной стадии к сверхбыстрым катастрофическим стадиям – режимам с обострениями на различных масштабах;
- выявление возможной автономности развития деформационных процессов в разломных зонах от унаследованного характера напряженного состояния.

В работе геологическая среда рассматривается как нелинейная динамическая система, эволюционирующая в поле приложенных сил по законам нелинейной динамики. Ключевой идеей для выявления пространственно-временной неоднородности развития деформационных процессов является идея самоорганизованной критичности (далее СОК) нагруженной геосреды как типичной нелинейной динамической системы. Для нагруженной геологической среды, обладающей свойством СОК, наличие квазистационарных этапов развития деформационных процессов, а также их развитие в сверхбыстрых катастрофических режимах (режимах с обострением) в локальных областях, является неотъемлемой частью эволюционного процесса. Такое поведение поддерживает квазистационарное состояние среды на макромасштабе в целом. Подобная постановка задачи является объединением традиционных методов и подходов механики деформируемого твердого тела, геомеханики, геодинамики, а также теории нелинейных динамических систем, и обеспечивает научную новизну работы, позволяет отвлечься от большого числа различных механизмов и горно-геологических условий, обеспечивающих то или иное развитие деформационных процессов в земной коре и анализировать наиболее общие закономерности формирования и развития очагов разрушения в нагруженной геологической среде. При этом внимание в работе сосредоточено на хорошо инструментально изученных регионах – Алтае-Саянской складчатой области и Байкальской рифтовой зонах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЯ TiN НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ–ПОДЛОЖКА»

Еремина Г.М., Смолин А.Ю.

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: anikeeva@ispms.ru, asmolin@ispms.ru*

Тазобедренный сустав (ТБС) является важным для опоры и передвижения человека. Патология ТБС влечет за собой ухудшение функционирования всего опорно-двигательного аппарата. Для лечения патологий ТБС в современном мире широко применяют эндопротезирование. Износ в паре трения составных элементов конструкции эндопротеза (ЭП) оказывает значительное влияние на его эксплуатационный ресурс. При этом структура поверхностных слоев контактирующих элементов играет ключевую роль в процессе изнашивания. Для улучшения трибологических характеристик металлических эндопротезов применяют упрочняющие покрытия. В качестве металла, как правило, используется титан, а в качестве покрытия – нитрид титана (TiN). Структура покрытия определяется способом его нанесения. Одним из способов нанесения покрытия является порошковое азотирование (PIRAC – powder immersion reaction assisted coating nitriding). Покрытия, полученные таким способом, имеют хорошую адгезию с материалом подложки. Поэтому перспективным является применение металлических имплантатов с PIRAC-покрытием.

Механическое поведение таких покрытий в условиях трения и изнашивания мало изучено, нет точных данных по влиянию на износ и трибологические характеристики таких факторов, как пористость покрытия, его толщина, шероховатость, сложная трехмерная структура покрытия, определяемые режимом нанесения. Кроме того, износ элементов протеза в паре трения оказывает существенное влияние на распределение напряжений в эндопротезе и окружающих его тканях в целом при динамических нагрузках. Поэтому необходимо проводить исследования механического поведения титанового ЭП с покрытием, выбранным с учетом износа в паре трения.

Для определения трибологических и механических параметров системы «покрытие–подложка» экспериментально используются такие методы как измерительное царапание и трехточечный изгиб. При проведении натурального эксперимента проблематичны исследования влияния конкретного фактора на механическое поведение системы. Поэтому все большую популярность приобретают методы математического моделирования механического поведения ЭП.

Для исследования влияния параметров системы «покрытие–подложка» на ее механическое поведение при измерительном царапании и трехточечном изгибе применялся метод подвижных клеточных автоматов. Главным преимуществом метода для решения поставленных задач является возможность явного учета несплошностей материала и моделирование разрушения. Были проведены тестовые расчеты по сжатию модельных образцов на сходимость. Далее были построены численные модели царапания и трехточечного изгиба и проведены расчеты с целью исследования влияния структурных особенностей поверхностного слоя на механическое поведение системы.

По результатам моделирования были выявлены закономерности влияния толщины и шероховатости покрытия на трибологические и механические характеристики системы «покрытие–подложка».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00323

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ СПЛАВА АМГ5 НА ДЕФЕКТНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Заикина А.А., Колубаев А.В., Сизова О.В., Колубаев Е.А.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: aa@ispms.ru, kav@ispms.ru, ovs@ispms.ru, eak@ispms.ru*

Лазерная сварка относится к одному из способов соединения плавлением, но по сравнению с другими родственными процессами сварки отличается концентрированной и строго дозированной энергией. Специфической особенностью лазерной сварки алюминиевых сплавов является образование дефектов, обусловленных высокой теплопроводностью и жидкотекучестью алюминия. Это является серьезным фактором, сдерживающим внедрение процесса в промышленность. Известны различные методы воздействия на ванну расплава – это применение защитных атмосфер – газов аргона и гелия и введение легирующих присадок. В данной работе было проведено исследование качества сварных соединений пластин алюминиево-магниевого сплава АМг5 толщиной 3,0 мм, выполненных способом лазерной сварки в защитных газовых средах.

Для исследования был выбран термически неупрочняемый деформируемый алюминиево-магниевого сплава в отожженном состоянии. Сварку осуществляли с помощью СО2-лазера в среде аргона или смеси аргона и гелия в соотношении 1:1 при установленной мощности лазерного излучения 3,4 и 3,2 кВт соответственно. Качественный и количественный анализ микроструктуры изучали на металлографических оптических микроскопах и на сканирующем электронном микроскопе Philips SEM 515.

Одним из основных показателей качества процесса сварки является сохранение химического состава исходного материала в зоне сварного соединения, прежде всего легкоиспаряющихся элементов, таких как магний, марганец. Микроанализ состава сварного шва сплава АМг5М показал, что при лазерной сварке в выбранных защитных средах соблюдается идентичность элементного состава исходного металла и металла в зоне шва, т. е. в процессе сварки не происходит так называемого «выгорания» основных элементов, в частности магния. При сварке в среде аргона не удалось избежать образования структурных дефектов, таких как технологические поры и кристаллизационные трещины. Варьирование параметров процесса сварки, таких как мощность лазера и скорость сварки, не позволило исключить технологические поры полностью. Они расположились, главным образом, в верхней части сварного шва, средний размер их составил 0,6–1,7 мм. При защите сварного шва гелием и аргоном, при сохранении основных параметров сварки, получили значительно лучшую структуру материала шва, практически не содержащую технологических пор. Результаты испытаний на статическое растяжение показали, что все образцы разрушились по зоне сварного шва. Образцы, сваренные в защитной смеси газов аргона и гелия, обладали более высокой прочностью и пластичностью по сравнению с образцами, сваренными в среде аргона. При этом общий характер разрушения у образцов как сваренных в среде аргона, так и сваренных в среде гелия и аргона, был вязкий.

В результате выполненных исследований показано, что структура сварного шва сплава АМг5М, полученного лазерной сваркой, имеет зонное строение. К центральной зоне, состоящей из разориентированных кристаллитов, примыкает зона перехода к основному металлу, структура, которой представляет собой дендриты, вытянутые от линии сплавления в направлении центра шва. Кроме того, из-за термопластического эффекта на участке основного металла, примыкающего к шву, образуется зона термического влияния с отличной от основного металла структурой. Установлено, что разрушение образцов после испытаний на растяжение, обусловлено большим количеством крупных технологических пор.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. и при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0190, идентификатор проекта RFMEFI60717X0190).

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Большаков А.М., Захарова М.И.

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
Сибирского отделения РАН, г. Якутск,
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Российская Федерация,
e-mail: marine3@yandex.ru*

Повышение промышленной безопасности опасных производственных объектов в условиях Севера требует всестороннего учета влияния специфических для данного района природно-климатических факторов на параметры риска.

Анализ риска – новое научное направление, представляет собой один из существенных компонентов обеспечения безопасности и проводится для выявления отдельных источников опасности и оценки их потенциального влияния на возможные ущербы, которые могут быть причинены населению, окружающей среде и хозяйственным объектам.

Резервуары, нефтепроводы, газопроводы относятся к опасным производственным объектам, неконтролируемое развитие аварийных ситуаций на этих объектах может привести к значительным разрушениям и к гибели людей, а также к необратимым последствиям в окружающей природной среде.

Для элементов технических систем, эксплуатируемых в условиях Севера, определяющим внешним фактором являются низкие температуры атмосферного воздуха, которые ухудшают основные физико-механические свойства конструкционных материалов, повышают их склонность к хрупкому разрушению как потенциальному источнику возможных аварий.

Для снижения вероятности разрушения газопроводов необходимо развитие и внедрение новых методов неразрушающего контроля оборудования, ранжирование обнаруженных при диагностике дефектов в длительно эксплуатируемых конструкциях по степени риска возникновения катастрофического разрушения вследствие протекания деградиационных процессов в материале в процессе эксплуатации, разработка и принятие нормативных документов, регулирующих их строительство и эксплуатацию с учетом изменения физико-механического состояния металла труб при длительной эксплуатации.

В целях безопасности населения от промышленных взрывов и пожаров необходима оценка безопасных расстояний от аварий резервуаров, нефтепроводов, газопроводов с учетом внешних метеорологических условий Севера (низкие температуры, мощные продолжительные температурные инверсии и штиль), которые существенно увеличивают значения параметров поражающих факторов при аварии.

Результаты анализа риска имеют существенное значение для принятия обоснованных и рациональных решений по чрезвычайному реагированию, а также для определения места размещения производственных объектов.

STRUCTURAL (MACRO-MESO) AND PHISICAL-MECHANICAL TRANSFORMATIONS IN COPPER DURING SEVERE PLASTIC DEFORMATION

Rogachev S.O.¹, Zemlyakova N.V.²

¹The National University of Science and Technology MISIS,
4, Leninskiy Ave., Moscow, 119049, Russian Federation,

²Mechanical Engineering Research Institute of RAS (MERI RAS),
8, Belinskogo St., Nizhny Novgorod, 603024, Russian Federation,
e-mail: serti222@ya.ru

The structure isotropy of ultrafine-grained materials is considered to be an important requirement for a material. The aim of the study is to understand better the formation of the structure at the first stage of metal processing under high pressure. It was found that the structure depends on the balance between the processes of strain hardening and dynamic recrystallization. On the one hand, the accumulation of dislocations is important; on the other hand, their annihilation should be taken into account too. The features of the formation of the structure and properties after 2.4.8 passes of ECAP are considered in this paper. For the study, an M1 copper rod with a diameter of 20 mm was made, in the initial large-crystalline state and after 2 passes of equal-channel angular pressing along the b, c route at room temperature. The microstructure of the sample initially represents deformation twins. X-ray diffraction analysis was carried out on a diffractometer with CoK α radiation in the range of angles 2 θ from 40 to 115. Microstructure studies were carried out on a JEM-2100 (JEOL) transmission electron microscope. The idea of the work is hybrid deformation of copper in the state first with large-size grains, then with ultra-fine grains. The results of the work are presented in fig. 1 and in table 1.

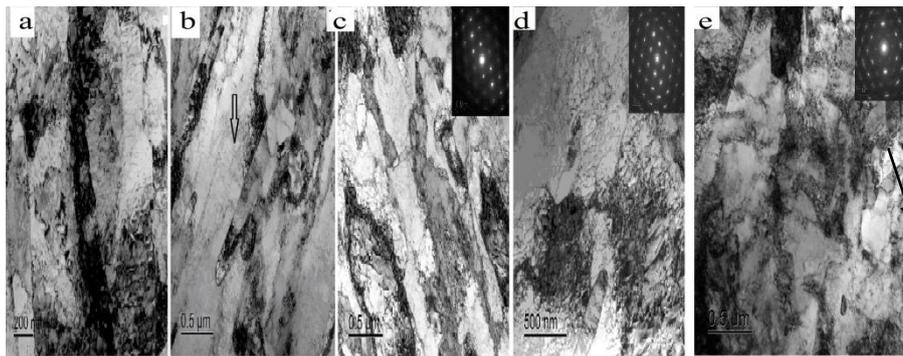


Fig. 1. Photographs of fine structure copper after 2 passes of ECAP

Table 1.

Materials state	The interplanar distance d , Å	The lattice parameter a , Å	Specific electrical resistance ρ , $\Omega \cdot m$	Coherent scattering regions D , nm
Initial	1.0908	3.6177	0.0228	118
After 2 passes	1.0907	3.617	0.0227	177

If the structure is obtained that consists of 100 nm to 1 μm wide alternating shear bands (fig. 1 a, b, c) located inside the primary deformed grain. The dimensions of the fragments are 1...0.5 (fig. 1 e). In the grain structure there are deformation twins (fig. 1 e). It is important to note the appearance of the nucleus of dynamic recrystallization sized 0.3 μm and dislocation cells (shown in black and white arrows, respectively, in fig. 1 b, e). After 2 passes, X-ray diffraction data confirms the relaxation processes in the form of the increasing size of coherent scattering regions (D) and decreasing resistivity.

Acceleration of dynamic recrystallization for obtaining a homogeneous structure of the material and decreasing electrical resistivity during ECAP is possible with the use of preliminary deformation of the sample.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВБЛИЗИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ, ОБРАЗОВАННОЙ В ВОЛОКНИСТОМ КОМПОЗИТЕ, ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Зингерман К.М., Каплунов И.А.

*Тверской государственный университет, д. 33, ул. Желябова, г. Тверь, 170100, Российская Федерация,
e-mail: zingerman@rambler.ru*

Исследуется для случая конечных плоских статических деформаций напряженно-деформированное состояние вблизи эллиптической полости, образованной в волокнистом нелинейно-упругом композите, при конечных деформациях. Цели исследований – анализ влияния расположения полости (дефекта) относительно включения (волокна) и соотношения размеров полости и включения на концентрацию напряжений в вершинах эллиптической полости, анализ нелинейных эффектов. Постановка задачи осуществляется на основе теории многократного наложения больших деформаций [1]. Для решения задачи используются приближенные аналитические методы [2–4]: метод возмущений, метод Колосова–Мусхелишвили, метод Шварца (для учета взаимовлияния отверстий). Расчеты выполнены для случая, когда включение и матрица изготовлены из несжимаемых упругих материалов, свойства которых описываются определяющими соотношениями для потенциала Муни–Ривлина. Рассматривается взаимовлияние изолированного включения и полости в бесконечно протяженном теле. Предполагается, что включение имеет круговую форму в момент образования полости. Показано, что влияние включения на напряженное состояние вблизи эллиптической полости может быть существенным, а влияние нелинейных эффектов на концентрацию напряжений может достигать 30 % в том диапазоне нагрузок, для которых проводились расчеты.

Авторы благодарят профессора В.А. Левина (МГУ) за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России в рамках базовой части Государственного задания (проект № 9.7446.2017/8.9).

Литература

1. Levin V. A. Theory of repeated superposition of large deformations: elastic and viscoelastic bodies // International Journal of Solids and Structures. – 1998. – Vol. 35. – P. 2585–2600.
2. Levin V. A., Zingerman K. M. Interaction and Microfracturing Pattern for Successive Origination (Introduction) of Pores in Elastic Bodies: Finite Deformation // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1998. – Vol. 65, no. 2. – P. 431–435.
3. Левин В. А., Зингерман К. М. Точные и приближенные аналитические решения при конечных деформациях и их наложении : в 5 т. / под общ. ред. В. А. Левина. – Т. III : Нелинейная вычислительная механика прочности. – М. : Физматлит, 2016. – 400 с.
4. Зингерман К. М., Левин В. А. Перераспределение конечных упругих деформаций после образования включений. Приближенное аналитическое решение // Прикладная математика и механика. – 2009. – Т. 73, вып. 6. – С. 983–1001.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕСУРСА КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МАЛОМ ОБЪЕМЕ ИСПЫТАНИЙ

Зинин А.В.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
д. 4, Волоколамское шоссе, Москва, 125993, Российская Федерация,
e-mail: allzin@yandex.ru

Ограничения по срокам и материальным ресурсам при экспериментальной отработке новой техники чаще всего приводят к тому, что ресурсные испытания проводят в минимальном объеме и количество испытанных объектов исчисляется единицами. Расширяющееся применение в летательных аппаратах композитных конструкций усложняет проблему назначения ресурсных показателей в связи с большим по сравнению с металлами рассеянием долговечностей и практически отсутствием экспериментальных данных по выносливости натуральных композитных объектов [1].

В таких условия решение задач установления достоверных и технически приемлемых показателей ресурса элементов авиационных конструкций из композиционных материалов возможно лишь на основе статистических методов [2].

Безопасный ресурс $T_{без}$, который рассматривается как величина допустимой наработки, в течение которой в конструкции не возникали усталостные повреждения, снижающие прочность ниже допустимого уровня, определяют исходя из результатов ресурсных испытаний конструкций и такой величины коэффициента безопасности $\eta(p)$, при которой вероятность хотя бы одного случая достижения предельного состояния не превышала некоторую малую величину p :

$$T_{без}(p) = \frac{\bar{N}}{\eta(p)},$$

где \bar{N} – математическое ожидание экспериментальных значений долговечности композитной конструкции.

Принято считать, что для композитных материалов распределение долговечностей соответствует (подобно металлам) нормальному закону распределения логарифма долговечностей с математическим ожиданием $\overline{\lg N}$ и дисперсией $S_{\lg N}$:

$$\lg N(p) = \overline{\lg N} + S_{\lg N} u_p,$$

где u_p – квантиль нормального распределения для вероятности p . В этом случае величина коэффициента надежности при назначении ресурса определяется главным образом степенью рассеяния экспериментальных данных по долговечности реальных конструкций с поправкой на малый объем испытаний n [3]:

$$\lg N(p_{без}) = (\overline{\lg N} + S_{\lg N} u_{p_{без}}) + \frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}} u_{p_{дог}} = \overline{\lg N} + S_{\lg N} \left(u_{p_{без}} + \frac{u_{p_{дог}}}{\sqrt{n}} \right);$$

$$\eta = 10^{-S_{\lg N} \left(u_{p_{без}} + \frac{u_{p_{дог}}}{\sqrt{n}} \right)}$$

Здесь $p_{без}$ – вероятность разрушения конструкции; $p_{дов}$ – доверительная вероятность оценки математического ожидания логарифма долговечности $\overline{\lg N}$.

Однако известно, что усталость композитных материалов характеризуется высоким уровнем рассеяния долговечности (для разных композитов $S_{\lg N}$ варьируется от 0,2 до 1,2 [4]). Для ограниченного объема натуральных испытаний оценка среднего квадратического отклонения является весьма ненадежной, что завышает коэффициент надежности. Так, для вероятностей $p_{без} = 0,001$, $p_{дов} = 0,01$ и $S_{\lg N} = 0,5$ при 2 испытанных объектах коэффициент надежности $\eta = 31,8$.

Анализ особенностей усталостного разрушения композитных материалов указывают на предпочтительное применение распределения Вейбулла для статистического описания характеристик долговечности композитов [4]. Являясь частным случаем известного в математической статистике третьего предельного распределения минимального члена выборки, распределение Вейбулла в большей степени, чем иные законы распределения, соответствует механизмам разрушения по моделям «слабого звена», характерным для композитных материалов.

Двухпараметрическое распределение Вейбулла долговечностей задается функцией:

$$p(N_p \leq N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{\beta} \right)^\alpha \right],$$

где α , β – параметры формы и масштаба распределения соответственно. По статистическим оценкам α и β и значениям гамма-функция Γ рассчитывают среднее значение долговечности:

$$\bar{N} = \beta \cdot \Gamma \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha} \right).$$

Для распределения Вейбулла с известным параметром формы масштабные параметры случайных выборок образуют распределение χ^2 [5], из которого следует квантильное значение случайной величины (долговечности) N для вероятности p определяемое по выборочному значению β :

$$N(p) = \hat{\beta} (-\ln p)^{1/\alpha} = \beta \left[\frac{-\ln p}{\chi_{1-\gamma}^2(2n)/2n} \right]^{1/\alpha}.$$

В итоге коэффициент надежности определяют для различных вероятностей разрушения и объемов испытаний по формуле

$$\eta(p) = \frac{\bar{N}}{N(p)} = \frac{\Gamma \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha} \right)}{\left[\frac{-\ln(1 - p_{без})}{\chi_{p_{дов}}^2(2n)/2n} \right]^{1/\alpha}}.$$

Для большинства композитных материалов на полимерной матрице значения параметра α , полученные по результатам усталостных испытаний, лежат в пределах 1,1...3,5. Так, для стеклоуглепластиковой панели с показателем $\alpha = 1,13$ при $p = 1 - p_{без} = 0,9$ и $p_{дов} = 1 - \gamma = 0,95$ получаем коэффициент надежности при 3 испытаниях – $\eta = 14,3$.

Литература

1. Азиков Н. С., Зинин А. В. Оценка прочности и усталости сетчатой композитной конструкции // Материалы XXIII международного симпозиума им. А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», Вятчи, 13–17 февраля 2017. – 2017. – С. 4–5.
2. Характеристики сопротивления усталости. Расчетные методы оценки / М. Н. Степнов, С. Л. Чернышев, И. Е. Ковалев, А. В. Зинин. – М. : Издательский центр «Технология машиностроения», 2010. – 256 с.
3. Райхер В. Л. Рассеяние усталостной долговечности. – М. : МАТИ, 2003. – 222 с.
4. Степнов М. Н., Зинин А. В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. – М. : Инновационное машиностроение, 2016. – 392 с.
5. Tomblin J., Seneviratne W. Determining the Fatigue Life of Composite Aircraft Structures Using Life and Load-Enhancement Factors : Report DOT/FAA/AR-10/6. – U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2011.

ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ АРАМИДНЫХ НИТЕЙ

Злобина И.В., Бекренев Н.В.

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
д. 77, ул. Политехническая, г. Саратов, 410054, Российская Федерация,
e-mail: irinka_7@mail.ru*

В настоящее время в структурах МЧС и вооруженных силах, в том числе для экипировки летного состава ВВС, достаточно широко применяются легкие гибкие средства индивидуальной защиты 1–2 классов на основе арамидных тканых материалов и их композиций с клеевыми составами, а также сверхвысокомолекулярного полиэтилена [1–3].

Арамидным тканям присущи и значительные недостатки, связанные со слабым противодействием малоскоростным твердым ударникам, ослаблением защитных свойств при намокании, воздействием прямых солнечных лучей, достаточно большим броневым эффектом, приводящим к серьезным травмам.

Цель исследований – изучение возможности улучшения прочности арамидных нитей, как основы тканей и композитов, при воздействии микроволнового излучения.

Выполнены исследования влияния СВЧ обработки на физико-механические свойства арамидных нитей ТСВМ-ДЖ артикул 56319А, являющихся основой конструкционных композиционных изделий малоразмерной авиатехники и защитных бронепакетов. Во всех экспериментах использовали нити толщиной 0,05 мм.

Арамидные нити рвутся практически сразу, СВЧ обработка при среднем значении удельной мощности повышает осевую разрывную нагрузку на нить ТСВМ-ДЖ практически в 2 раза. Влияние СВЧ электромагнитного поля на прочность нити при воздействии нагрузки в поперечном направлении выражено в меньшей степени. Прочность на разрыв в поперечном направлении возрастает не более чем на 18–20 %.

При СВЧ воздействии малой удельной мощности эффекты по увеличению разрывной прочности ниже и не превышают 25–30 %, что может быть связано с недостатком энергии для организации значительного количества межволоконных связей. При воздействии СВЧ электромагнитного поля более высокой удельной мощности увеличение прочности или не наблюдается, или она снижается на 7–10 %. Причиной может быть чрезмерный разогрев нитей, приводящий к деструкции составляющих их волокон.

Таким образом, кратковременное воздействие СВЧ электромагнитного поля на нити из материалов, используемых при изготовлении конструктивных элементов авиационной техники, а также гибких индивидуальных средств защиты типа ТСВМ-ДЖ способствует повышению разрывной прочности отдельных нитей. Причиной полученных результатов является формирование за счет взаимодействия микроволнового излучения с макромолекулами полимера дополнительных зон связей на микроуровне (волокна и фибриллы) и наноуровне (макромолекулы), а также повышение эластичности волокон, что обеспечивает повышение суммарной разрывной прочности нитей, а также увеличивает период времени до их разрыва.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электро-технологическими методами».

Литература

1. Bhatnagar Ashok. Lightweight ballistic composites. – Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2006. – 416 p.
2. Чистяков Е. Российские бронежилеты и новые броневые материалы. – URL: http://ser-sarajkin.narod2.ru/ALL_OUT/TiVOut13/RuPersAr/RuPersAr001.htm
3. Игнатова А. М., Артемов А. О. Аналитический обзор современных и перспективных материалов и конструкций бронепреград и защит от поражения // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6–1. – С. 101–105.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО УПРОЧНЯЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Злобина И.В.¹, Бекренев Н.В.¹, Тетерин Д.П.², Слонов В.Н.³

¹ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
д. 77, ул. Политехническая, г. Саратов, 410054, Российская Федерация,

²АО «Авиаавтоматика» имени В.В. Тарасова,

д. 47, ул. Запольная, г. Курск, 305040, Российская Федерация,

³АО «КБПА», д. 239, ул. Большая Садовая, г. Саратов, 410005, Российская Федерация,

e-mail: irinka_7@mail.ru

Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике.

Цель исследований – экспериментальное определение возможности упрочняющего микроволнового модифицирования окончательно сформированной и отвержденной структуры конструкционных композиционных материалов типа стекло- и углепластиков.

Для достижения цели исследований решаются задачи оценки изменения прочности образцов после микроволновой обработки по критерию изгибных напряжений, поскольку композиционные материалы, как правило, хуже работают на изгиб и межслоевой сдвиг, чем на нагрузки в продольном направлении. Для обоснования полученных результатов необходимо исследовать микроструктуру образцов.

По результатам обработки данных экспериментальной установки получены графические зависимости, анализируя которые видно, что при малой мощности микроволнового излучения изгибные напряжения возрастают в среднем на 41 % и практически не зависят от времени воздействия. При обработке на средней мощности зависимость эффекта упрочнения от времени также не существенна. Эффект упрочнения нестабилен и составляет от 29 % до 53 %. При использовании электромагнитного поля большой мощности проявляется явная зависимость увеличения прочности материала от времени – при увеличении времени воздействия с 1,5 до 3 мин изгибные напряжения возрастают почти на 47 %. Однако при значениях времени наблюдается снижение прочности, что требует объяснения. Зависимости, полученные при проведении аналогичных исследований стеклопластика, имеют другой характер. При малом времени воздействия с увеличением подводимой мощности излучения наблюдается стабильное увеличение прочности образца, определяемое по предельным напряжениям изгиба, при увеличении времени прочность образца возрастает, но имеет тенденцию к снижению при возрастании мощности. Наконец, при максимальном из исследованного диапазоне значения времени воздействия достигается максимальный эффект упрочнения при малой мощности, но при ее увеличении резко снижается.

Полученные результаты позволяют заключить, что воздействие микроволнового излучения определенной, не приводящей к деструктивному нагреву мощности на окончательно сформированное изделие из полимерных композиционных материалов, армированных углеродными и стеклянными волокнами, вызывает изменения микроструктуры, проявляющиеся в уплотнении материала.

Результаты, представленные в материалах, получены при финансировании Министерства образования и науки РФ, проект 9.2108.2017/ПЧ «Разработка и экспериментальная разработка теоретических основ применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами вертолетного типа взлетной массой до 500 кг при выполнении поисково-спасательных операций на воде».

Кошкин Р. П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем. – URL: <http://spmagazine.ru/420> (дата обращения: 28.01.2017).

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО УРАВНЕНИЯ ПОДОБИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Степнов М.Н., Зубань В.Н., Зинин А.В.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
д. 4, Волоколамское шоссе, Москва, 125993, Российская Федерация,
e-mail: zuban467@mail.ru

Эффективным методом расчетного обоснования ресурсных характеристик авиационных конструкций является использование феноменологических моделей накопления усталостного повреждения в ресурсоограничивающих зонах узла с учетом их корректировки для реальных условий нагружения [1]. Для расчетной оценки долговечности элементов использована скорректированная линейная теория накопления повреждений Когаева [2], согласно которой предельное состояние в опасном сечении конструкции определяется суммированием усталостных повреждений, полученных конструкцией на каждом i -ом этапе:

$$T_{расч} = \frac{a_p}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}},$$

где $T_{рес}$ – ресурс элемента; n_i – количество циклов эквивалентных циклов нагружения на каждом из m этапов полета (например, для узлов шасси $m = 4$ – руление до разбега, разбег, пробег после посадки и руления после пробега); N_i – предельная наработка (долговечность) при нагрузках, соответствующих i -му повреждающему этапу; a_p – накопленное повреждение:

$$a_p = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\sigma_{ai}^{экг}}{\sigma_{a \max}^{экг}} \cdot \frac{n_i}{\sum n_i} \right).$$

Здесь $\sigma_{ai}^{экг}$ – амплитуда эквивалентного напряжения на i -ом режиме; $\sigma_{ai \max}^{экг}$ – наибольшая из $\sigma_{ai}^{экг}$. Амплитуды эквивалентного напряжения симметричного цикла пересчитывают исходя из реального асимметричного цикла нагрузок по уравнению Степнова [3].

Основную трудность при расчете ресурса в этом случае представляет определение долговечностей, соответствующих каждому режиму полета, с учетом асимметрии циклов нагружения в эксплуатации, концентрации напряжений в опасных сечениях детали и масштабного фактора конструкции по результатам лабораторных испытаний на усталость образцов материалов.

Все эти факторы позволяет учесть теория подобия усталостного разрушения [2], согласно которой предельные циклические напряжения в опасном сечении конструкции связаны с параметрами нагруженности и геометрией элемента соотношением

$$\lg \sigma_R = A_0 - B \lg \left(\frac{L}{G} \right),$$

где σ_R – предел выносливости детали с заданной геометрией и уровнем концентрации напряжений; A_0 и B – параметры модели, определяемые по результатам испытаний на усталость образцов материала; L/\bar{G} – критерий подобия усталостного разрушения,

учитывающий различие в геометрии и концентрации напряжений реального объекта и лабораторного образца; L – часть периметра, прилегающая к зоне повышенной напряженности; $\bar{G} = G/\sigma_{\max}$ – относительный градиент первого главного напряжения, равный отношению градиента напряжений G к их максимальной величине σ_{\max} [4].

Параметры уравнения подобия A_0 и B определены по результатам испытаний на усталость образцов с различной геометрической формой и степенью концентрации напряжений аппроксимацией экспериментальных данных прямыми в координатах $\lg \sigma_{\max} - \lg(L/\bar{G})$. Таким образом, по результатам испытаний образцов конструкционного материала вычисляются пределы выносливости конструкции при различных показателях масштаба и концентрации напряжений. Для практического вычисления повреждаемости уравнение подобия Когаева следует модифицировать с целью непосредственного определения долговечности конструкции при фактических значениях переменных напряжений $\sigma_{ai}^{экс}$. Результаты испытаний образцов показывают, что параметр B уравнения практически не зависит от базы испытаний (наработки), а для параметра A_0 установлена следующая зависимость от количества циклов нагружения:

$$A_0 = A + \frac{D}{\lg N}.$$

В итоге получаем обобщенное уравнение кривой усталости на основе теории подобия усталостного разрушения в виде:

$$\lg \sigma_R = A + \frac{D}{\lg N} - B \lg \left(\frac{L}{G} \right) \quad \text{или} \quad \lg N = \frac{D}{\lg \sigma_R - A + B \lg \left(\frac{L}{G} \right)}.$$

Последнее соотношение позволяет вычислять долговечность при нагрузках i -того этапа нагружения:

$$N_i = 10^{\frac{D}{\lg \sigma_{ai}^{экс} - A + B \lg \left(\frac{L}{G} \right)}}.$$

Литература

1. Зинин А. В., Дедова М. Н., Абрамова Е. А. Усталость и разрушение болтовых соединений композитных конструкций при малоцикловом нагружении // Решетневские чтения : материалы IX Международной научной конференции. – Красноярск, 2005. – С. 150–152.
2. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М. : Машиностроение, 1977. – 232 с.
3. Степнов М. Н., Зинин А. В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. – М. : Инновационное машиностроение, 2016. – 392 с.
4. Характеристики сопротивления усталости. Расчетные методы оценки / М. Н. Степнов, С. Л. Чернышев, И. Е. Ковалев, А. В. Зинин. – М., 2010. – 256 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Зубова Е.М., Вильдеман В.Э.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация,
д. 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: cem.zubova@mail.ru*

Переход к использованию композиционных материалов в ответственных конструкциях приводит к необходимости подробного изучения процессов деформирования, накопления повреждений и разрушения. Применение дополнительных методов диагностики для экспериментального изучения таких процессов в материалах под действием нагрузок, получение и анализ новых опытных данных позволят в дальнейшем своевременно обнаружить дефекты, которые свидетельствуют о снижении несущей способности конструкции или могут повлечь за собой потерю ее целостности.

В работе рассматривается вопрос об использовании метода регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии для экспериментального исследования процессов накопления повреждений в углерод-углеродных композиционных материалах и керамических покрытиях. Анализ результатов экспериментального изучения процессов разрушения композиционных материалов посвящено большое количество научной литературы. В современных научных публикациях уделено внимание использованию данного метода для изучения накопления повреждений в композиционных материалах и контроля над процессом растрескивания и разрушения функциональных покрытий при деформировании [1–2].

Экспериментальное исследование процесса накопления повреждений в композиционных материалах и керамических покрытиях содержало программу испытаний образцов материалов с одновременной регистрацией сигналов акустической эмиссии для оценки процесса разрушения. Сбор данных производился с помощью акустико-эмиссионной системы AMSY-6 фирмы Vallen Systeme GmbH (Германия), с использованием широкополосных пьезоэлектрических преобразователей М31 (диапазон частот 300–800 кГц), АЕ144А (диапазон частот 100–500 кГц) и АЕ105А (диапазон частот 450–1150 кГц).

В ходе работы получены новые экспериментальные данные, на основании которых построены графики зависимостей параметров акустической эмиссии от времени. Полученные графики говорят о стадийности накопления повреждений в композиционных материалах и преобладании различных механизмов на разных стадиях деформирования. При анализе полученных сигналов от разрушения керамического покрытия описан характер накопления повреждений при механических испытаниях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-31-00452 мол_а, № 16-41-590360 р_а.

Литература

1. Экспериментальное исследование влияния высокотемпературной обработки тканого наполнителя на прочностные свойства углеродных композитов / А. И. Шилова, Д. С. Лобанов, В. Э. Вильдеман, Ю. Б. Лямин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 221–239.
2. Струнгарь Е. М., Зубова Е. М., Лобанов Д. С. Исследования механизмов разрушения покрытия композиционного материала с использованием бесконтактной оптической видеосистемы и системы регистрации сигналов акустической эмиссии // Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела. – 2017. – С. 244–247.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА «ПАВЛОВСК–МАЙЯ»

Большаков А.М., Иванов А.Р.

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, СО РАН,
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Российская Федерация,
e-mail: a.m.bolshakov@mail.ru, spartak01@mail.ru*

В работе проведены исследования по оценке состояния и определению допустимого срока безопасной работоспособности магистрального газопровода (далее МГ) «Павловск-Майя» АО «Сахатранснефтегаз» по его наиболее нагруженным узлам и элементам, работающим в наиболее неблагоприятных условиях. Представлено сравнение стандартной оценки остаточного ресурса магистральных газопроводов с разработанной методикой оценки остаточного ресурса трубопроводов и резервуаров, работающих в условиях Крайнего Севера.

Для исследований были выбраны участки основного металла на различных участках МГ. В работе применялись стандартные методы измерения и контроля технических характеристик, используемые в экспертизе промышленной безопасности технических устройств. Измерение толщины стенок газопровода проводилось ультразвуковым толщиномером «ТУЗ-2», а определение твердости материала газопровода – переносным твердомером «ТЭМП-4» в шурфах, на открытых участках и крановых узлах по сечениям в четырех плоскостях по часовой стрелке по ходу движения продукта. За действительное значение толщины и твердости стенки принимается средний результат не менее чем из 3 замеров в каждой точке.

Необходимо устранить несанкционированные пересечения трассы газопровода с подъездными дорогами и установить опознавательные знаки на железнодорожном переезде. По результатам определения остаточного ресурса выяснено, что остаточный ресурс газопровода, вычисленный по разработанной методике, равен 22 годам, а остаточный ресурс, рассчитанный по стандартной методике, равен 57 годам.

Исследование показало, что МГ «Павловск–Майя» находится в работоспособном состоянии. Рекомендуется ежегодно проводить контроль коррозионного состояния методами неразрушающего контроля.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НЕФТЕПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Иванова И.К.^{1,2}, Семенов М.Е.², Корякина В.В.²

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
д. 58, ул. Беллинского, г. Якутск, 677000, Российская Федерация,

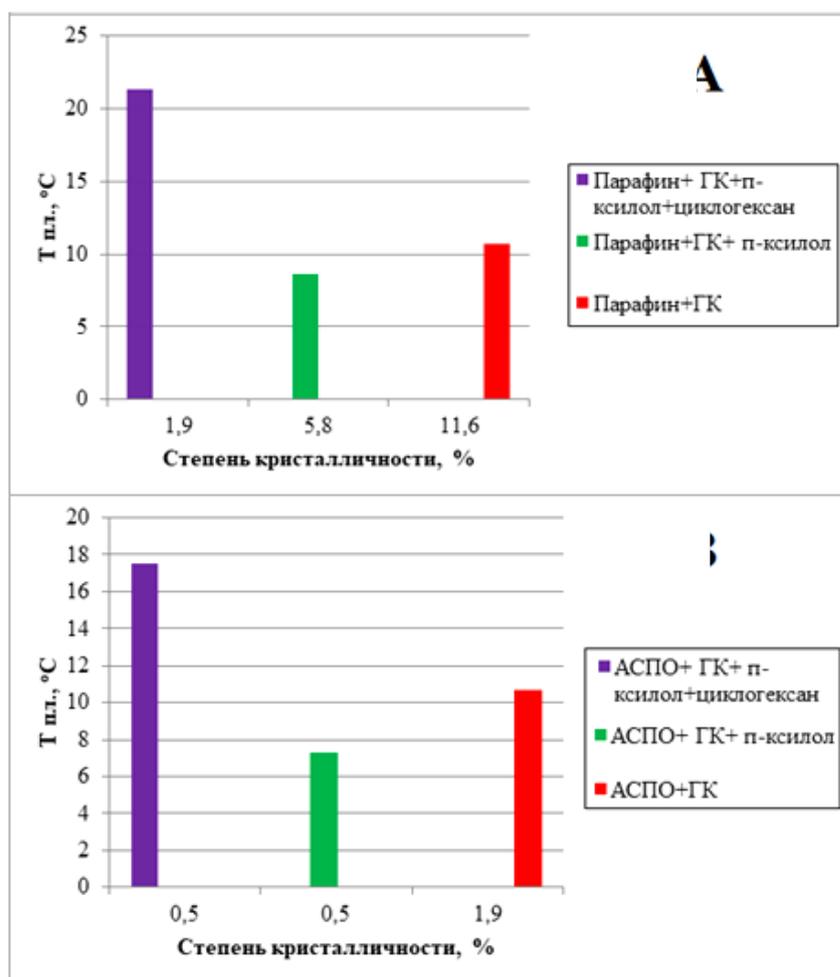
²Институт проблем нефти и газа СО РАН,
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Российская Федерация

До недавнего времени образование асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) считалось крайне негативным явлением, осложняющим процесс добычи, транспорта и хранения нефти. Однако в настоящее время появились новые тенденции использования АСПО при трубопроводной транспортировке нефти [1], которые заключаются в создании равномерного слоя АСПО для следующих целей: 1) антикоррозионной изоляции от внутренней коррозии, поскольку АСПО, заполняя шероховатости и коррозионные повреждения внутренней поверхности труб, образуют защитный слой, который препятствует дальнейшему разрушению материала нефтепровода за счет исключения прямого контакта с нефтью; 2) тепловой изоляции, благодаря низкому коэффициенту теплопроводности АСПО; 3) снижения энергозатрат на перекачку нефти, которая достигается путем уменьшения гидравлического сопротивления нефти из-за незначительной шероховатости парафинового слоя. В условиях криолитозоны использование слоя АСПО как естественной изоляции внутренней поверхности труб имеет первостепенную важность, так как внутренняя изоляция приведет к уменьшению тепловых потерь от нефти в окружающую среду, что позволит избежать протаивания и разрушения грунта. В связи с этим, в данной работе предпринята попытка изучения влияния различных углеводородных растворителей на тепловые свойства отложений парафина с целью моделирования и создания изоляционного слоя из АСПО с заданными свойствами.

Для приготовления объектов исследования использовали: 1) нефтяной парафин марки В₂, который является высокоочищенным, не содержит воды и механических примесей, которые могут исказить результаты исследования и 2) парафинистые АСПО, отобранные с поверхности насосно-компрессорных труб (НКТ) на Иреляхском газонефтяном месторождении (ГНМ) Республики Саха (Якутия). В качестве объектов исследования послужили 10 % мас. растворы нефтяных парафинов и АСПО в газовом конденсате (ГК), который добывается на Иреляхском месторождении и в настоящий момент используется для удаления АСПО с поверхности нефтепромыслового оборудования, и в композиционных растворах на его основе с добавлением циклогексана и *n*-ксилола для оценки влияния нафтеновых и ароматических компонентов в составе ГК на свойства кристаллизующихся парафинов. Температуры начала и массовой кристаллизации нефтяных и промысловых парафинов в ГК и его композитах опубликованы в [2].

Измерения температур и энтальпий плавления парафинов в исследуемых растворах проводили на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204 HP Phoenix фирмы Netzsch (Германия). Относительная погрешность измерения энтальпии составляет ± 3 %, погрешность измерения температуры $\pm 0,1$ °С. Степень кристалличности (СК) (%) исследуемых образцов вычисляли делением энтальпии плавления образца на энтальпию плавления парафина со 100 %-ой кристалличностью, считается, что эта величина составляет 200 Дж/г [3]. В результате проведенных исследований установлено, что СК как нефтяных, так и промысловых парафинов в составе АСПО имеют максимальные значения в ГК – 11,6 и 1,9 % соответственно, а при добавлении ароматических и нафтеновых составляющих в ГК их СК понижается до 1,9 и 0,5 % (рисунок). Снижение СК можно объяснить внедрением молекул ароматической и нафтеновой компонент между молекулами парафина, что приводит к уменьшению взаимодействия молекул парафина и нарушению его дальнего порядка. Интересно отметить, что несмотря на минимальные значения СК нефтяных и промысловых парафинов в тройном

растворителе их температуры плавления имеют максимальные значения, причем в случае промышленных парафинов в составе АСПО в бинарной и тройной системах, где парафин имеет одинаковые значения СК (0,5 %), их температуры плавления существенно различаются и составляют 7,3 и 17,5 °С соответственно. Морфологические исследования, проведенные в работе [2] показали, что именно в тройной системе парафин обладает пористой структурой, а как известно пористые материалы имеют низкую теплопроводность, возможно этим и объясняется высокие температуры плавления этих образцов по сравнению с другими объектами. На основании вышеизложенного парафин из тройного растворителя можно рассматривать как перспективный материал для создания теплоизоляционного слоя в трубопроводах в условиях криолитозоны.



Зависимость температуры плавления от степени кристалличности нефтяного (а) и промышленного парафина в составе АСПО (б) в их 10 % растворах в газовом конденсате (ГК) и в композициях на его основе

Таким образом, как показали ДСК-исследования модельных и нативных парафиновых систем, степень кристалличности осаждаемых парафинов зависит от типа растворителя и уменьшается в следующей последовательности: газовый конденсат→газовый конденсат+*n*-ксилол→газовый конденсат+*n*-ксилол+циклогексан, а их температуры плавления увеличиваются в ряду: газовый конденсат+*n*-ксилол→газовый конденсат→газовый конденсат+*n*-ксилол+циклогексан. Возможно, что результаты проведенного исследования послужат научной основой для разработки нового направления – создания естественного изоляционного слоя с заданными свойствами, путем направленного запарафинивания трубопроводов, предназначенных для транспортировки нефти в условиях влияния многолетнемерзлых пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках выполнения базовой части государственного задания проект 10.7697.2017/ВУ «Организация проведения научных исследований».

Литература

1. Гильмутдинов Н. Р., Дмитриев М. Е., Мастобаев М. Н. Новые направления использования асфальтосмолопарафиновых отложений в процессе трубопроводного транспорта нефти // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 2. – С. 8–12.
2. Иванова И. К., Корякина В. В., Семенов М. Е. Исследование фазовых переходов нефтяных парафинов в углеводородных растворителях различной химической природы // Журнал прикладной химии. – 2015. – Т. 88, № 8. – С. 1208–1216.
3. Crude oils: characterization of waxes on cooling by D.S.C. and thermomicroscopy / J. M. Létoffé, P. Claudy, M. V. Kok, M. Garcin, J. L. Volle // Fuel. – 1995. – Vol. 74. – № 6. – P. 810–817.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ КАМНЕЛИТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ СВОЙСТВ

Игнатова А.М.¹, Верещагин В.И.², Игнатов М.Н.¹

¹ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
29, пр. Комсомольский, Пермь, 614000, Российская Федерация,

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
30, пр. Ленина, Томск, Томская обл., 634050, Российская Федерация,

e-mail: iampstu@gmail.com

Каменное литье – материал, получаемый неполной кристаллизацией расплавов горных пород (базальты, габбро-диабазы, основные и ультраосновные породы) и техногенного минерального сырья (отходы добычи железных руд, металлургические и твердые топливные шлаки). Каменное литье обладает смешанной структурой, 88–96 % приходится на поликристаллические составляющие, остальная доля представлена аморфной остеклованной массой, обладает плотностью 2,7–2,9 г/см³, механической прочностью при сжатии 240–290 МПа, твердостью по Моосу 6–8, низким коэффициентом теплопроводности ~4,6 Вт/м·°С при температуре до 100 °С и коэффициентом термического расширения ~(7,8–8,4) α·10⁶.

При высоких эксплуатационно-технических характеристиках каменного литья, доля его использования, в качестве конструкционного материала, составляет 1–2 %, причиной этого является отсутствие унифицированного подхода при выявлении взаимосвязей свойств камнелитых материалов с морфологическими параметрами его структуры.

Цель исследования – разработка формализованного подхода к оценке морфологических особенностей структуры камнелитых материалов для прогнозирования свойств.

По данным о строении шпинелид-пироксенового каменного литья сформулирована интерпретация его сферолитной структуры, она включает следующие элементы: кристаллические сферолиты, кристаллические сферолиты с ядром, ядро сферолита и аморфная составляющая. Кристаллы шпинелида имеют скелетное строение и форму октаэдра, образованного из четырех тетраэдрических кристаллов. Шпинельные кристаллические образования выполняют роль модификатора, вокруг которого чередуются пироксены (соединения из 1-цепочных и 2-цепочных силикатов). Сферолито-зернистые агрегаты образуются в форме лучистых агрегатов цепочных минеральных фаз, чередующиеся между собой по количеству цепочек. Остальное пространство в структуре заполняет аморфная составляющая. Предложено описать структуру каменного литья через индекс сферолита, который определяется отношением толщины пироксеновой прослойки к приведенному диаметру шпинелидного ядра. Индекс сферолита является динамически изменяющейся величиной по мере нарастания величины переохлаждения расплава, он зависит от состава жидкой фазы и фугитивности кислорода в расплаве.

Доказано, что индекс сферолита коррелируется с толщиной стеклофазной прослойки и с количеством сферолитов в единице объема материала, характер корреляции зависит от ионного баланса сырьевой композиции для получения расплава. При величине индекса сферолита 1,9–2,1 толщина стеклофазной прослойки составляет 3–5 мкм и количество сферолитов в единице объема 0,5–1,5·10⁶ шт/мм³. При величине индекса сферолита 1–1,5 толщина стеклофазной прослойки составляет 5–7 мкм и количество сферолитов 6–7·10⁶ шт/мм³. При величине индекса сферолита 10 толщина стеклофазной прослойки составляет менее 1,5 мкм, сферолиты склонны к взаимному прорастанию и количество в единице объема материала составляет 0,9–1,1·10⁶ шт/мм³.

Установлено, что при известной корреляции между степенью кристалличности, фазовым составом и величиной свойств камнелитых материалов, существует корреляция между функциональными свойствами и индексом сферолита. Шпинелид-пироксеновому каменному литью с повышенной износостойкостью соответствует индекс сферолита 1,9 (размер шпинелида 3–4 мкм); с повышенной диссипативной способностью – 1,5 (размер шпинелида 2–3 мкм); с повышенной термической стойкостью – 10 (размер шпинелида 1–3 мкм).

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ДВУХОСНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Ильиных А.В.

ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, пр. Комсомольский, г. Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ilinih@yandex.ru

Исследование особенностей механического поведения и процессов разрушения конструкционных сплавов при малоциклового усталости и сложном напряженном состоянии является актуальной задачей в связи с необходимостью изучения закономерностей накопления повреждений и прогнозирования циклической долговечности. Для расчета ресурса высоконагруженных деталей и элементов конструкций необходимо использовать модели накопления повреждений, параметры которых определяются из экспериментов со специальным образом составленными программами нагружения [1–3].

Для проведения испытаний на малоциклового усталость при сложном напряженном состоянии использовались двухосевая испытательная система Instron 8850 и динамический двухосевой датчик деформаций Epsilon, позволяющие проводить измерения усилий до 160 кН, моментов до 1 кНм, осевых деформаций до 5 % и углов закручивания до 4°. В экспериментах образцы с кольцевым поперечным сечением подвергались циклированию, в котором реализуется близкое к однородному напряженное состояние. Двухосевой экстензометр позволяет проводить испытания в режиме жесткого циклического нагружения и реализовать различные траектории деформирования при пропорциональном и непропорциональном изменении осевых и сдвиговых деформаций. На основе показаний датчика деформаций для выбранных циклов записываются диаграммы деформирования в виде петель гистерезиса, анализ которых позволяет определять накопленную в цикле поврежденность, прогнозировать усталостную долговечность и исследовать закономерности механического поведения конструкционных сплавов.

Получены новые результаты экспериментов на малоциклового усталость, показывающие влияние вида напряженного состояния, разных соотношений сдвиговых и осевых деформаций, различных форм циклов на закономерности механического поведения конструкционного сплава ЭП517Ш. Для оценки процесса циклического разрушения опробованы различные энергетические модели накопления повреждений, в которых поврежденность в каждом цикле оценивается на основе анализа параметров петель гистерезиса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-41-590392)

Литература

1. Ильиных А. В., Вильдеман В. Э., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование механического поведения конструкционных сплавов при двухосном циклическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 51. – С. 115–123.
2. Nikhamkin M., Ilinykh A. Low cycle fatigue and crack grown in powder nickel alloy under turbine disk wave form loading: validation of damage accumulation model // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 467. – P. 312–317.
3. Малоциклового усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин / А. А. Иноземцев, А. М. Ратчиев, М. Ш. Нихамкин, А. В. Ильиных, В. Э. Вильдеман, М. А. Вятчанин // Тяжелое машиностроение. – 2011. – №. 4. – С. 30–33.

ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОГРУЖНЫХ НЕФТЕНАСОСОВ

Исмаилов Г.М., Тюрин А.Е.¹, Павлов М.С.², Минеев В.Е.

Томский государственный педагогический университет, г. Томск, ул. Киевская, д. 60, 634061, Россия,

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики г. Санкт-Петербург, Кронверский пр., д. 49, 197101, Россия,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

г. Томск, пр. Ленина, д. 30, 634050, Россия,

e-mail: gmismailov@rambler.ru

Показателем надежности технического изделия является ресурс его работы. В условиях эксплуатации одним из главных приоритетных направлений в нефтедобывающей отрасли является обеспечение надежности кабелей погружных нефтенасосов для бесперебойной работы оборудования. Многие работы [1, 2] по кабелям для погружных нефтенасосов посвящены электрической прочности кабеля, т. е. обеспечению требуемых электрических параметров в процессе эксплуатации. Кабели для нефтепогружных насосов подвергаются также механическим деформациям, которые приводят к потере прочности кабеля и прекращению его функционального назначения. Кабели подвергаются к механическим деформациям при перемотке с барабана на барабан и в местах перегиба при выполнении спускоподъемных работ.

Цель работы – исследование усилия взаимодействия элементов нефтепогружного кабеля при изгибе во время проведения спускоподъемных работ.

Методы

Для определения усилий взаимодействия между элементами кабеля использована общая теория составных стержней строительной механики [3]. Рассматривается деформация кабеля при его намотке на барабан. В расчетной схеме для облегчения решения задачи конструкция нефтепогружного кабеля упрощена и принята как трехслойная балка. Получены формулы для усилий сдвига между элементами плоского кабеля погружного бронированного плоского (КППП) для нефтепогружных насосов.

Результаты

На основании формул, полученных авторами, впервые определены усилия взаимодействия между ТПЖ и броней кабеля при деформациях изгиба. Исследованы влияния длины зоны деформации и сечения токопроводящих жил на усилия сдвига между элементами нефтепогружного кабеля. Полученные результаты можно использовать при расчетах кабеля для оценки трибологического взаимодействия между отдельными элементами и прочности кабеля [4]. Деформации вызывают сдвиги токопроводящей жилы относительно ее изоляции и брони. При проектировании нефтепогружного кабеля, особенно когда выходят из строя элементы, в том числе из-за истирания изоляции и потери прочности, необходимо учитывать влияния этих усилий сдвига. Для учета влияния каждого отдельного элемента на кабель, его конструкцию можно рассмотреть как многослойную балку с составными элементами.

Выводы

Полученные выражения для определения усилий сдвига позволяют оценить силовое взаимодействие элементов кабеля и могут быть использованы для создания конструкций кабелей для нефтепогружных насосов с учетом механических деформаций.

Литература

1. Кабели и провода. Основы кабельной техники / А. И. Балашов, М. А. Боев, А. С. Воронцов и др. / под ред. И. Б. Пешкова. – Москва : Энергоатомиздат, 2009. – 470 с.
2. Месенжник Я. З. Новый концептуальный подход к конструированию специальных силовых кабелей для электропитания погружных нефтенасосов // «ЭЛЕКТРО». Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2010. – № 4. – С. 11–21.
3. Ржаницын А. Р. Строительная механика : учебное пособие для вузов. – Москва: Высшая школа, 1982. – 400 с. : ил.
4. Оценка силового взаимодействия элементов конструкции кабеля при изгибе / Г. М. Исмаилов, В. М. Мусалимов, В. Д. Шиянов, С. В. Лутовинов // Известия ТПУ. – 2011. – Т. 318, № 2. – С. 44–48.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ПОДРОСТКОВОМ ДЕНТИНЕ НА МИКРО- И НАНО-УРОВНЕ

Кабанова А.В.¹, Занг Ц.², Панфилов П.Е.¹

¹Институт естественных наук и математики, УрФУ,
19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: gerbers13@mail.ru, peter.panfilov@urfu.ru,

²Институт материаловедения им. Э. Шмида, Австрия,
8700, Леобен, Jahnstrasse, 12, e-mail: zaoli.zhang@oeaw.ac.at

Дентин – твердая ткань человеческого организма, обладающая развитой иерархической структурой, которая состоит из органических и неорганических компонент в объемном соотношении 1:1. Цель работы – изучение механизмов разрушения дентина на микро- и наноуровнях и определение механизмов релаксации напряжений в подростковом дентине. Образцы для исследования готовили из интактных моляров пациентов подросткового возраста (от 13 до 18 лет), удаленных по медицинским показаниям, которые разрезали перпендикулярно главной оси зуба. Тонкие фольги для ПЭМ получали путем химического утонения в потоке концентрированной ортофосфорной кислоты по методу «окна». Подростковый дентин находится в аморфном состоянии, имеет слоистую морфологию, толщина слоя 50–100 нм. Слои ориентированы перпендикулярно главной оси зуба.

На микроуровне трещины развиваются подобно трещинам в полимерных пленках, когда появлению и росту трещины предшествует значительная обратимая и необратимая деформация. Несмотря на острую вершину с углами при вершине 10–15°, трещина имеет неровные края, сложную форму и состоит из нескольких слившихся порообразных сателлитных трещин. У вершины трещины на траектории ее роста одна за другой расположены несколько порообразных сателлитных трещин. Сателлитные трещины перед вершиной располагаются внутри темной области. Можно предположить, что трещина должна распространяться внутри этой области. Однако в некоторых случаях фиксировали похожие темные области, но без трещин. Такой тип поведения трещин присущ упруго-пластичным полимерным пленкам и известен как «крейзинг» полимеров. Подобный характер роста трещин согласуется с вязкоупругим поведением дентина на макроскопическом уровне.

Трещины в дентине на нано-масштабе появлялись в процессе приготовления тонких фольг для ТЕМ. В тонких фольгах трещины распространяются от края к центру образца. Угол раскрытия трещины составляет примерно от 10 до 30°. Причиной появления прозрачной области в окрестности вершины трещины является утонение дентина за счет необратимой (пластической) деформации впереди трещины. Эту светлую узкую полосу можно рассматривать как пластическую зону перед вершиной трещины.

Показано, что трещины в дентине на микро- и нано- масштабах являются вязкоупругими. Для них характерны следующие черты: вершины затуплены, перед фронтом трещины имеется пластическая зона, в которой развиваются порообразные сателлитные трещины. При этом на макро-уровне при приложении растягивающих нагрузок дентин ведет себя как хрупкий материал.

Работа выполняется при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-04073а., КАВ) и РНФ (грант № 15-19-10007, ППЕ).

О КОНТАКТЕ РЕГУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ ШТАМПОВ И СЛОИСТЫХ ОСНОВАНИЙ С УЧЕТОМ СЛОЖНЫХ ФОРМ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Казаков К.Е.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
д. 101, корп. 1, пр-т Вернадского, Москва, 119526, Российская Федерация;
Московский государственный технический университет имен. Н.Э. Баумана,
д. 5, стр. 1, ул. 2-я Бауманская, Москва, 105005, Российская Федерация,
e-mail: kazakov-ke@yandex.ru*

Работа посвящена исследованию контактного взаимодействия тел с покрытиями и систем жестких штампов с учетом сложных форм поверхностей. Такие задачи интересны как с практической, так и с теоретической точек зрения. В теоретическом плане они интересны тем, что для построения их решений необходимо развивать существующие и разрабатывать новые методы решения систем интегральных уравнений. С практической же точки зрения, интерес к ним вызван тем, что построенные эффективные решения позволяют учитывать сложные формы контактирующих тел, приобретенных за счет, например, механической обработки, особенностей изготовления и др. Формы контактирующих тел можно намеренно делать сложными, чтобы минимизировать уровни действующих в основании технологических напряжений и формировать выгодные распределения контактных напряжений в зонах опирания конструкций, возводимых на таком основании. Учет особенностей контактирующих тел позволит на этапе проектирования вносить необходимые изменения в проект с целью уменьшения риска разрушения и минимизации износа механизмов и конструкций.

В данной работе рассмотрена плоская задача взаимодействия регулярной системы жестких штампов и вязкоупругого стареющего основания с тонким покрытием переменной толщины. Предполагается, что основания штампов и покрытие имеют сложные формы поверхностей, которые можно описать различными быстро изменяющимися функциями. Для рассмотренной задачи построена система смешанных интегральных уравнений, содержащая интегральные операторы различных типов, с дополнительными условиями. Аналитическое решение для одного варианта постановки задачи построено при помощи проекционного метода А. В. Манжирова. В выражениях для контактных напряжений под штампами в явном виде выделены функции, описывающие формы контактирующих поверхностей, что позволяет производить эффективные расчеты даже в случаях, когда эти функции являются быстро изменяющимися. Также получены аналитические выражения для остальных неизвестных характеристик на каждом штампе.

Автор благодарит А. В. Манжирова за постановку задачи, полезные обсуждения и ценные советы. Исследование выполнено частично при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-01-00770 и № 18-01-00920.

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12X18Н10, СВАРЕННОЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Калашников К.Н.^{1,2}, Жуков Л.Л.², Дмитриев А.В.², Калашникова Т.А.²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, Томск, 634050, Российская Федерация,

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4 пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,

e-mail: sso.spektr.asu@gmail.com, mcleon@inbox.ru, al1soft@hotmail.com, gelombang@ispms.tsc.ru

Известно, что в процессе лазерной сварки, как и в результате любой другой сварки плавлением, возможно образование макродефектов типа несплошностей и структурных микродефектов, которые могут понизить прочность получаемых изделий. Основной причиной возникновения таких дефектов, как правило, является не оптимальный подбор параметров сварки для выбранного материала. В связи с этим актуальной задачей является поиск способов оптимизации режимов сварки для получения соединений высокой прочности. В работе было использовано внедрение ультразвукового воздействия в процессе лазерной сварки. В качестве заготовок для исследуемых образцов использовался листовой прокат из аустенитной стали 12X18Н10 толщиной 5,0 мм. Образцы были получены методами лазерной сварки без ультразвукового воздействия и лазерной сварки с ультразвуковым воздействием. Далее образцы подвергались испытаниям на статическое растяжение и ударную вязкость. Также были выполнены измерения микротвердости полученных сварных соединений.

В результате выполненных исследований было выявлено, что образцы, сваренные без ультразвукового воздействия, имеют прочность при растяжении от 580 до 591 МПа при прочности основного металла 690 МПа. Деформация происходит однородно в три основные стадии. Относительное удлинение образцов при растяжении достигает 50 %. Значения ударной вязкости в сварном шве составляют 52–55 % от ударной вязкости основного металла. Измерения микротвердости показывают, что в зоне шва наблюдается незначительное увеличение средних значений микротвердости относительно основного металла.

Образцы, сваренные с применением ультразвукового воздействия, показывают более высокие значения предела прочности при растяжении в сравнении с образцами, полученными без ультразвукового воздействия. Более того, при различных режимах сварки значения прочности являются очень близкими и изменяются от 602 до 606 МПа. Значения ударной вязкости также превышают таковые для сварки без ультразвукового воздействия и составляют 59–62 % от ударной вязкости основного металла. Средние значения микротвердости немного ниже, чем в образцах, сваренных без ультразвукового воздействия, однако они практически не изменяются при отклонении от оптимального режима.

Основываясь на вышесказанном, можно сделать вывод, что применение ультразвукового воздействия в процессе лазерной сварки позволяет получать сварные соединения высокой прочности. Важным фактором является небольшое изменение прочностных характеристик при отклонениях от оптимального режима и увеличение их средних значений, в отличие от лазерной сварки без ультразвукового воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0190, идентификатор проекта RFMEFI60717X0190).

ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Калашников К.Н.^{1,2}, Чумаевский А.В.², Иванов А.Н.²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: sso.spektr.asu@gmail.com, tch7av@gmail.com, ivan@ispms.ru

В настоящее время одним из важнейших направлений в материаловедении является изучение ультрамелкозернистых (УМЗ) и нанокристаллических (НК) материалов и способов их получения. Это связано с тем, что такие материалы обладают уникальными свойствами благодаря повышенной прочности и пластичности. Однако большинство методов получения таких материалов могут служить лишь для исследования структур и свойств получаемых образцов. Прежде всего это связано с малыми размерами изделий и технологической сложностью их производства. Обработка трением с перемешиванием – это метод интенсивной пластической деформации, который позволяет получать материалы с УМЗ-структурой по толщине обрабатываемых заготовок в масштабах, пригодных для промышленного применения.

Обработка трением с перемешиванием является самостоятельным ответвлением метода сварки трением с перемешиванием. Обработка проводится путем внедрения в заготовку специального инструмента, который переводит металл в пластифицированное состояние и перемешивает его в этом состоянии без образования жидкой фазы. В работе проводилась обработка термически упрочняемого алюминиевого сплава Д16 с целью выявления особенностей получаемых структур и определения механических свойств. В результате проведенных исследований было выявлено, что структура зоны перемешивания представляет собой динамически рекристаллизованную область со средним размером зерна на уровне 1 мкм, а также частицами вторичных фаз AlMgCu и Al₂MgCu, наибольшие размеры которых не превышают 400 нм. Механическая прочность полученных образцов при растяжении сравнима с прочностью исходного материала. Испытания образцов на сжатие демонстрируют рост прочности до 110 % от прочности исходного металла. Отклонение параметров обработки от оптимальных приводит к значительному снижению прочности – вплоть до 50 %, что связано с возникновением дефектов.

Результаты показывают, что метод обработки трением с перемешиванием позволяет получать материалы с высокой механической прочностью, превышающей прочность исходного материала. Структура полученных образцов представлена равноосным зерном с включениями упрочняющих интерметаллидных фаз. При этом важное значение имеет процесс оптимизации параметров обработки для различных материалов, поскольку отклонение параметров от оптимальных приводит к возникновению дефектов в обработанной зоне и ухудшению механических свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-48-700652) и в рамках выполнения проекта III.23.2.4 «Разработка компьютерных моделей и развитие подходов к созданию материалов и покрытий с многоуровневой структурой, в том числе триботехнического назначения, для систем, работающих в сложных динамических условиях эксплуатации» (№ 0367-2018-0008).

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ИНСТРУМЕНТА

Калашников К.Н., Чумаевский А.В., Воронцов А.В.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: sso.spektr.asu@gmail.com, tch7av@gmail.com, vorontsov.a.583@gmail.com*

Фрикционная перемешивающая обработка является перспективным и востребованным на настоящее время способом формирования ультрамелкозернистой структуры на поверхности материалов, основанном на пластической деформации при фрикционном контакте. Обработка происходит путем внедрения вращающегося пина в материал за счет разогрева металла в зоне контакта и продольного перемещения инструмента вдоль образца. В результате происходит перемешивание материала в зоне, определяемой размером пина и плеч инструмента, что приводит к измельчению зерна и изменению структурно-фазового состояния. Данным методом возможно получение материалов со средним размером зерна менее 1 мкм, при этом не затрагивая внутренние объемы материала, также возможно формирование объемных ультрамелкодисперсных материалов. Несмотря на большое количество работ в последнее время на данную тематику, до настоящего времени имеется мало данных по обработке материала с применением различных видов инструмента, отличающихся как наличием или отсутствием пина, так и формой и расположением насечки на инструменте.

Цель работы – выявление влияния на структуру металла в зоне обработки формы и размера насечки на инструменте без пина и размера пина в инструменте с его наличием.

Проведенные исследования показали, что структура металла при обработке инструментом с наличием пина высотой 2,5 и 5 мм представлена классической комбинацией зон, наблюдаемой при сварке трением с перемешиванием и фрикционной обработке в большом спектре работ. Структура металла в зоне обработки беспиновым инструментом аналогична структуре, наблюдаемой в зоне влияния плеч стандартного инструмента. Во всех исследованных случаях структура металла в зоне перемешиванием представлена ультрамелкозернистой. Также проведенные исследования показали, что применением беспинового инструмента возможно добиться наименьшей глубины обработанного слоя, а с помощью изменения параметров насечки на инструменте возможно управление структурой зоны перемешивания.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013–2020 гг., направление III.23.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Калашникова Т.А.¹, Белобородов В.А.¹, Калашников К.Н.^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,

e-mail: gelombang@ispms.tsc.ru, vabel@ispms.tsc.ru, sso.spektr.asu@gmail.com

Лазерная сварка, как и другие методы получения неразъемных соединений различных материалов, не лишена различных дефектов, таких как неравномерность проплавления корня шва и пористость в сварном шве. Наличие дефектов оказывает значительное влияние на механические свойства получаемых соединений и ограничивает их эксплуатацию в ответственных конструкциях. Одним из наиболее перспективных методов улучшения свойств сварных соединений является внедрение ультразвукового воздействия в процессе сварки.

В данной работе были получены образцы неразъемных соединений листового проката феррито-перлитной стали 09Г2С толщиной 2,5 мм, полученных методами лазерной сварки и лазерной сварки с применением ультразвукового воздействия в различных режимах, для сравнения их механических свойств. Результаты проведенных исследований показывают, что прочность образцов, полученных методом лазерной сварки без ультразвукового воздействия, при испытании на статическое растяжение составляет от 77 % до 100 % от прочности основного материала. Причем сварные соединения, равнопрочные с основным металлом, характеризуются высокой степенью пластической деформации и разрушением по основному металлу. Испытания на ударную вязкость показали значения, составляющие в зоне сварного шва от 25 % до 38 %, а в околошовной зоне от 38 до 63 % от ударной вязкости основного металла для различных режимов. Образцы, полученные методом лазерной сварки с применением ультразвукового воздействия, имеют прочностные характеристики, схожие с образцами, полученными без ультразвукового воздействия. Однако, внедрение ультразвука в процессе сварки делает образцы менее чувствительными к отклонению от оптимальных режимов. Так, если образцы, сваренные без ультразвукового воздействия, имели прочность при статическом растяжении от 370 до 461 МПа, то образцы, сваренные по аналогичным режимам, но с применением ультразвукового воздействия, имеют предел прочности от 419 до 450 МПа.

Таким образом, применение ультразвукового воздействия в процессе лазерной сварки позволяет получать неразъемные соединения из стали 09Г2С с высокими прочностными характеристиками, обеспечивая получение образцов высоко качества даже при отклонении от оптимальных режимов сварки.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0190, идентификатор проекта RFMEFI60717X0190).

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И СУХОМ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Калашникова Т.А., Чумаевский А.В., Иванов А.Н.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: gelombang@ispms.tsc.ru, tch7av@gmail.com, ivan@ispms.ru*

Изучение фундаментальной природы трения является серьезной проблемой в связи с тем, что изменения в условиях трения вносят существенные изменения в поведение системы в целом. В процессе трения возможно образование слоя износа, изменение шероховатости поверхности и адгезионный перенос материала в паре трения с одной поверхности на другую.

Считается, что адгезионное трение является недопустимым при работе в механизмах, однако при процессе сварки трением с перемешиванием (СТП) адгезионно-когезионный перенос мезо- и макроскопических объемов материала во всесторонне стесненных условиях неизбежен по умолчанию. Процесс СТП осуществляется посредством внедрения специального вращающегося инструмента под осевой нагрузкой в стык двух жестко закрепленных свариваемых заготовок. Вращающийся инструмент в результате фрикционного взаимодействия с обрабатываемым материалом разогревает последний и переводит его в пластифицированное состояние, не достигая температуры плавления. После погружения инструмента в пластифицированный материал до уровня заплечиков инструмента ему придается поступательное движение вдоль стыка свариваемых заготовок. При комбинации высоких температур и глубокой пластической деформации адгезия между инструментом и свариваемым металлом неизбежна, что оказывает большое влияние на структуру СТП соединения.

В работе проводилось сравнение адгезионного взаимодействия и особенностей массопереноса в условиях трения скольжения и при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава 157 °С. По схеме диск–диск были проведены эксперименты по трению скольжения при различных параметрах. Для выявления особенностей образования соединения проводилось исследование пластического течения в зоне перемешивания СТП соединения алюминиевого сплава 157 °С толщиной 35 мм. В результате проведенных исследований было выявлено, что структура зоны перемешивания СТП соединения представляет собой динамически и первично рекристаллизованную область. Подобная структура наблюдается при трении скольжения, а область, где материал испытывает меньшую деформацию и более низкую температуру, аналогична зоне термомеханического воздействия при СТП.

Работа выполнена в рамках выполнения проекта III.23.2.4 «Разработка компьютерных моделей и развитие подходов к созданию материалов и покрытий с многоуровневой структурой, в том числе триботехнического назначения, для систем, работающих в сложных динамических условиях эксплуатации» (№ 0367-2018-0008).

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УЛЬТРАМЕЛКОДИСПЕРСНОМ СОСТОЯНИИ, ПОЛУЧЕННЫХ МНОГОКРАТНЫМИ ПРОХОДАМИ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ

Калашникова Т.А., Чумаевский А.В., Калашников К.Н.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: gelombang@ispms.tsc.ru, tch7av@gmail.com, sso.spektr.asu@gmail.com*

Фрикционная перемешивающая обработка является на настоящее время одним из наиболее востребованных методов формирования структуры на поверхности различных сплавов. К преимуществам метода можно отнести низкую стоимость, высокую производительность обработки и возможность получения в зоне перемешивания структуры со средним размером зерна менее 1 мкм. Недостатком публикуемых в настоящее время работ является недостаточное количество данных по обработке большой площади поверхности материалов, возможной только при проведении большого числа проходов инструментов вдоль и поперек образца. В таком случае в структуре материала появляются помимо основных зон, обусловленных физикой процесса перемешивающей обработки, и другие зоны – обусловленные наличием продольных и поперечных пересечений обработанных поверхностей материала. Исследованию данных закономерностей посвящена основная часть настоящей работы.

Полученные данные свидетельствуют о низком влиянии на структуру металла, в зоне обработки от проведения смежных проходов инструментом вдоль линии обработки. В одних случаях, структура металла в граничной зоне между проходами представляла собой материал, практически идентичный по размеру и форме зерна материалу зоны перемешивания. В других случаях, в области на границе между проходами обнаруживались более крупные зеренные структуры, аналогичные наблюдаемым в зоне термомеханического влияния. На пересечении двух различных проходов, наоборот, структура отличается существенной неоднородностью. Параметры процесса обработки динамически изменяются в процессе создания ультрамелкодисперсного материала, особенно при пересечении ранее сформированного материала предыдущим проходом. Падение усилия сопротивления перемещению вдоль оси обработки при достижении предыдущего шва обусловлено предположительно изменением механизмов деформации материала. Влияние структурных изменений на механические свойства материала после обработки выражено слабо, во всех случаях предел прочности материала составлял не менее 0,95 от предела прочности основного металла. Для установления закономерностей изменения структурно-фазового состояния в зоне обработки в дальнейшей работе проведены исследования с применением просвечивающей микроскопии.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы, направление III.23.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 12Х18Н9Т, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ

Калашникова Т.А., Чумаевский А.В., Филиппов А.В.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: gelombang@ispms.tsc.ru, tch7av@gmail.com, avf@ispms.ru

Производство деталей аддитивным методом из металлических материалов является одной из наиболее острых задач в современной научно-технической сфере. Одним из наиболее приемлемых методов для получения образцов является метод печати, основанный на электронно-лучевой наплавке с подающейся в зону печати проволокой. При этом на настоящее время недостаточно данных по прочностным свойствам материалов, полученных аддитивным методом с подачей проволоки в зависимости от параметров изготовления образцов. Исследованию влияния параметров 3D-печати на механические свойства аустенитной стали 12Х18Н9Т посвящена настоящая работа.

Механические испытания осуществлялись на испытательной машине Testsystems 110М-10 при комнатной температуре. Направление растяжения совпадало с направлением 3D-печати. Вырезку образцов для механических испытаний осуществляли из трех областей изделия: первая область – образец со структурой, сформированной в процессе 3D-печати; вторая область – образец со структурой, сформированной в переходной области изделие–подложка; третья область – образец с исходной структурой (из подложки). Исследование поверхностей разрушения осуществляли на растровом электронном микроскопе NIKKISO SM3000.

Поверхность разрушения образца из области, сформированной в процессе 3D-печати, содержит микроскопические ямки с преимущественными размерами пор менее 5 мкм. Поверхность разрушения образца из переходной области (изделие–подложка) содержит более крупные ямки с размерами 20–30 мкм, но также и большое количество мелких ямок размером 3–5 мкм. На поверхности разрушения образца с исходной структурой (подложка) крупные ямки преобладают.

Предел прочности на растяжения для образцов, демонстрирующих наилучшие механические свойства, находится на уровне исходного материала стали 12Х18Н9Т (550 МПа). В ряде случаев прочность снижается до 450 МПа.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ГОРЯЧЕГО КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВОГО КОМПОЗИТА Al/V₄C

Коковихин Е.А., Волков В.П., Каманцев И.С., Гладковский С.В.

*ИМАШ УрО РАН, д. 34 ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: ks@imach.uran.ru*

В работе приводятся результаты модельных экспериментов по оценке влияния степени деформации на плотность порошкового компакта Al/V₄C при одноосном сжатии с целью оптимизации технологии получения композиционного материала методом горячей прокатки порошковой смеси в жесткой технологической оболочке.

Испытания по оценке влияния степени деформации на качество получаемых композиционных материалов были проведены с использованием пластометрического комплекса ЦКП «ИМАШ УрО РАН». Моделирующие испытания проведены при скорости деформации близкой к скорости в очаге деформации при прокатке и равной примерно $0,57 \text{ с}^{-1}$. В процессе осадки скорость деформации была постоянной, что обеспечивалось технической особенностью использованной испытательной машины. Для большего соответствия с процессом прокатки осадка образцов дробилась на три этапа с величиной относительной деформации $\varepsilon = 30 \%$ на каждом из этапов. В ходе экспериментов определялась взаимосвязь параметров процесса компактирования: степень деформации и усадки, плотность, температурно-временные условия, а также сравнительная оценка качества соединения частиц порошка между собой. Степень компактирования порошковой смеси оценивалась по ее расчетной плотности после каждой осадки и соотносилась с давлением в смеси при деформировании. Заданными параметрами эксперимента являлись температура деформации, время выдержки в печи, как при предварительном нагреве, так и промежуточных подогревах, а также степень деформации на каждом этапе осадки.

Для достижения заданных величин деформаций и снижения влияния неоднородностей деформации (в том числе исключения влияния стенок контейнера) при одноосном сжатии предложена телескопическая оболочка. Оболочка представляла собой стальные трубки, расположенные одна в другой с обеспечением плотного взаимного сопряжения для исключения выдавливания порошковой смеси и реализации условий деформации, близкой к однородной. В полость оболочки была помещена подготовленная смесь из порошков V₄C (25 % вес) и ПА-4 (75 % вес). Кроме того, производилась предварительная ручная трамбовка порошка до плотности $\sim 1,6 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$. Нагрев оболочек перед деформацией осуществляли в электрической печи. После каждого обжатия производили расчет плотности порошка, в частности, после второго обжатия она составляла $\sim 2,48 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, что соответствовало плотности компакта после второго прохода при горячей прокатке.

Таким образом, по результатам моделирующих экспериментов проведена оценка условий горячего компактирования порошкового композита Al/V₄C. С учетом полученных результатов была проведена опытная прокатка порошковой смеси в жесткой технологической оболочке, при этом контролировалось усилие прокатки и сопоставлялось с косвенным расчетом давления и плотности в оболочке, что позволило оптимизировать технологический процесс горячей прокатки и повысить качество порошковых композитов.

Важным моментом в апробации является корректировка температурного режима горячей прокатки, что позволило повысить эффективность получения композиционного материала при горячей прокатке и оптимизировать маршрут прокатки заготовки.

АНАЛИЗ РАБОТЫ СОВРЕМЕННЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ

Каменских А.А.

ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, пр. Комсомольский, Пермь, Российская Федерация,
e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

В настоящее время существует большой выбор антифрикционных полимерных материалов российского и зарубежного производства, пригодных в той или иной степени для работы в условиях контактного деформирования опорных частей мостов: антифрикционные композиционные материалы на основе фторопласта-4 с различными нанонаполнителями, модифицированный фторопласт, сверхвысокомолекулярные полиэтилены и др. Новые математические модели поведения таких материалов, отражающие их термомеханические, фрикционные и физико-механические особенности, позволят оценить их работу в качестве антифрикционного слоя опорных частей мостов и оптимизировать выбор материалов в зависимости от температурных и силовых условий работы конструкции. Особый интерес представляют рабочие и деформационные характеристики, качественные и количественные закономерности изменения параметров зон контакта, особенности работы в экстремальных эксплуатационных и температурных режимах и др. Особенно актуально исследование влияния коэффициента трения в реальных системах с антифрикционными покрытиями и прослойками, в которых реализуется сложный характер взаимодействия: более 2 поверхностей контакта, пространственная геометрия и условия нагружения, сложные в своем механическом поведении материалы. К таким конструкциям, в частности, относятся опорные части пролетных строений мостов.

В работе рассмотрена механика контактного взаимодействия элементов сферической опорной части мостового пролета через антифрикционную полимерную прослойку при изменении коэффициента трения между сопрягаемыми поверхностями. Сферическая опорная часть включает верхнюю стальную плиту с шаровым полированным сегментом – 1, нижнюю стальную плиту со сферическим вырезом – 2 и разделяющую их сферическую полимерную антифрикционную прослойку – 3. Данные по физико-механическим и фрикционным свойствам получены на основе серии экспериментов, проведенных д.ф.-м.н. А.А. Адамовым в Институте механики сплошных сред Уральского отделения РАН (Россия).

Задача реализуется в осесимметричной постановке в рамках деформационной теории упругопластичности. Общая математическая постановка задачи контактного взаимодействия включает уравнения равновесия, геометрические соотношения, физические соотношения [1].

Математическая постановка включает также граничные условия в декартовой системе координат: кинематические граничные условия на поверхности S_2 :

$$u_z = 0, \quad \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0, \quad \forall x \in S_2,$$

статические и кинематические граничные условия на S_1

$$\int_{S_1} p_z dS_1 = -Q_z, \quad u_z(x, y, h) = U = const, \quad \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad \forall x \in S_1,$$

где Q_z – вертикальная сила, приложенная к S_1 ; U – неизвестная величина. Остальные наружные поверхности остаются свободными от нагрузок.

Общая математическая модель контактного взаимодействия дополняется условиями взаимодействия на поверхности контакта, $S_K = S_{K_1} \cup S_{K_2} \cup S_{K_3}$, ранее приведенными в [1], где рассмотрены особенности конечно-элементного решения задачи на примере осесимметричного случая и проанализированы закономерности изменения контактных

параметров в случае действия вертикальной нагрузки при постоянном коэффициенте трения $k = 0,04$.

В рамках работы изучено влияние уровня вертикальной нагрузки и соответствующего ему коэффициента трения на параметры контактного взаимодействия элементов сферической опорной части через упругопластическую полимерную антифрикционную прослойку: контактное давление, контактное касательное напряжение и распределение зон контакта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-08-00903а.

Kamenskih A. A., Trufanov N. A. Regularities of interactions between elements of a spherical contact unit with an antifriction polymeric interlayer. – Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36, no. 2. – P. 170–176. – DOI: 10.3103/S1068366615020075.

ДИАГНОСТИКА СУБЪЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОКОВОК

Канюков С.И., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: avk@imach.uran.ru*

Технологическая подготовка кузнечного производства включает в себя проектирование поковки и разработку технологического процессаковки и связана с необходимостью выполнения многочисленных расчетов, с подготовкой и оформлением большого объема технической документации. Эффективным средством сокращения трудоемкости и сроков технологической подготовки и повышением качества проектирования является разработка систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП)ковки.

В Институте машиноведения УрО РАН (г. Екатеринбург) разработана интеллектуальная система автоматизированного проектирования технологииковки валов на прессах (САПР «ТЕХНОЛОГ»).

Начальным этапом проектирования технологииковки является проектирование поковки, которое заключается в назначении на исходную деталь припусков и кузнечных напусков. Назначение припусков осуществляется обычно в соответствии с рекомендациями ГОСТ 7062-90 и, как правило, затруднений не вызывает.

Решение задачи назначения напусков далеко не однозначно. Технологи даже одного предприятия, проектируя поковку для одной и той же детали, могут предложить разные варианты назначения напусков, каждый из которых позволит получить в итоге годную поковку и, следовательно, является допустимым. Поэтому результатом решения в общем случае является множество допустимых решений для выбора наиболее рационального решения в зависимости от поставленных целей.

Цель работы – формализация критерия диагностики допустимых решений для оценки качества решения задачи назначения напусков на поковки типа валов с учетом поставленных целей.

На примере решения конкретной технологической задачи назначения напусков на поковки типа валов при сформулированных целях, таких как экономия металла и невысокая трудоемкость изготовления поковки, предложена концепция оценки субъективных решений задачи проектирования поковки с использованием основных положений теории принятия решений в нечетких условиях по схеме Беллмана–Заде. Рассмотрены вопросы формализации субъективных целей, выбора функций принадлежности решений субъективным целям, компоновки этих функций в результирующую функцию принадлежности решений задачи множеству допустимых решений с учетом относительных важностей поставленных целей и формализации критерия оценки субъективных решений.

Предложенная концепция решения задачи позволяет выбирать из множества допустимых решений наиболее рациональные, соответствующие поставленным целям, сокращает участие пользователей в процессе автоматизированного проектирования и может быть использована для разработки алгоритмов и программ проектирования технологииковки других видов поволоков.

Работа выполнена по бюджетной теме № 0391-2016-0004 (з/р АААА-А18-118020790142-9).

ОНТОЛОГИЯ ВХОДНОГО ЯЗЫКА САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ВАЛОВ НА ПРЕССАХ

Канюков С.И., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: avk@imach.uran.ru*

Несмотря на развитие вычислительной техники, языков и методов программирования работы по автоматизации проектирования технологии ковки на прессах и внедрению соответствующих САПР в производство до сих пор не получили широкого развития. Это объясняется прежде всего тем, что проектирование технологии свободной ковки на прессах является слабо формализованным процессом.

Поэтому вопреки стремлению к сокращению доли участия человека в процессе автоматизированного проектирования, разработчики соответствующих САПР вынуждены закладывать в систему «приближенные» алгоритмы и программы решения технологических задач и, как следствие, предоставлять пользователям возможность исправления результатов проектирования в режиме графического диалога.

В Институте машиноведения УрО РАН (г. Екатеринбург) разработана интеллектуальная система автоматизированного проектирования технологии ковки валов на прессах (САПР «ТЕХНОЛОГ»). На всех этапах, начиная с ввода исходной информации и заканчивая оформлением результатов проектирования, предусмотрена возможность изменения пользователем решений, предлагаемых системой. Для реализации этого разработаны специальные средства лингвистического обеспечения САПР, в состав которых входят и входные языки, предназначенные для обеспечения взаимодействия конечного пользователя с САПР.

Цель работы – разработка онтологии входного языка САПР «ТЕХНОЛОГ», используемого при автоматизированном проектировании технологических процессов ковки валов на прессах.

В работе выполнена концептуализация предметной области с построением концептуальной схемы и выделением шести основных классов входного языка: Слиток, Оборудование, Переходы, Операции, Режимы, Завершение, для каждого класса определены состав экземпляров и их атрибутов, разработаны система аксиом входного языка и меню условной корректировки значений атрибутов и выбора из списка их возможных значений. Результаты работы продемонстрированы на конкретном примере и реализованы в действующей системе автоматизированного проектирования технологических процессов ковки валов на прессах в виде алгоритмов и программ.

Предлагаемая концепция построения онтологии входного языка предоставляет пользователям широкие возможности для внесения корректировок в спроектированную технологию ковки, что в свою очередь гарантирует получение технологических карт ковки, пригодных для запуска в производственный процесс, и существенно облегчает внедрение системы на различных предприятиях.

Работа выполнена по бюджетной теме № 0391-2016-0004 (з/р АААА-А18-118020790142-9).

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА РАСТВОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ СИЛОВОЙ МЕТАЛЛООПТИКИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕЕ РЕСУРСА

Филин С.А.¹, Роголин В.Е.^{2,3}, Каплунов И.А.³

¹Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997,
36, Стремянный пер., Москва, Российская Федерация,

²АО «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»,
95, Волоколамское ш., Москва, 125424, Российская Федерация,

e-mail: v-rogalin@mail.ru

³Тверской государственный университет,
33, ул. Желябова, Тверь, 170100, Российская Федерация,

e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

Производственные и эксплуатационные загрязнения на оптической поверхности приводят к заметному снижению порога оптического пробоя, что приводит к преждевременному выходу из строя дорогостоящего изделия. Поэтому тщательная очистка силовой лазерной оптики является важным фактором увеличения их ресурса. Для очистки силовой оптики используют галогензамещенные растворители, требующие предварительной подготовки.

В работе показана возможность их подготовки для данной очистки методом ионного обмена и адсорбции. Обоснована возможность очистки галогензамещенных растворителей для металлических зеркал с использованием анионитов с последующей оценкой их устойчивости в растворителях и скорости поглощения галогенводородных кислот для повышения ресурса их эксплуатации. Выявлен и обоснован феномен возрастания сорбционной способности анионита АВ-17х8 с увеличением его влажности за счет сверхэквивалентного поглощения хлорид-ионов.

На основе результатов испытаний по динамике сорбции анионитами галогенводородных кислот из модельных растворов были построены выходные кривые зависимости концентрации HCl в выходящем растворе от его объема. Для анионита АВ-17х8 различной влажности показано, что для разных скоростей пропускания растворов через ионнообменную колонку поглощающая способность анионита уменьшается с увеличением скорости пропускания раствора, а при одинаковой скорости сорбция возрастает с увеличением влажности анионита за счет сверхэквивалентного поглощения хлорид-ионов. Если органический растворитель содержит воду на уровне ее растворимости в этом растворителе, то при пропускании растворителя через анионитовый фильтр растворитель обезвоживается.

Показано, что анионит АВ-17х8 устойчив в галогензамещенных растворителях, в том числе при температуре их кипения. Анионит АВ-17х8 в гидроксильной форме повышает устойчивость галогензамещенных углеводородных растворителей к деструкции за счет их обезвоживания в дальнейшем, что существенно при очистке силовой лазерной оптики. При этом равновесная сорбционная емкость анионита АВ-17х8 в 2–3 раза превышает его обменную емкость и возрастает с увеличением его влажности за счет сверхэквивалентного поглощения хлорид-ионов.

Filin S. A., Rogalin V. E., Kaplunov I. A. Improving resource of metal mirrors for powerful lasers // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1915. – P. 040015.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ИК ЛАЗЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Рогалин В.Е.^{1,2}, Филин С.А.³, Каплунов И.А.²

¹АО «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»
95, Волоколамское ш., 125424, Москва, Российская Федерация,
e-mail: v-rogalin@mail.ru

²Тверской государственный университет,
33, ул. Желябова, Тверь, 170100, Российская Федерация,
e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

³Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
36, Стремянный пер., 117997, Москва, РФ

При использовании лазерного излучения в результате воздействия мощного лазерного импульса (при плотности мощности $10^6 \sim 10^7$ Вт/см²) в объеме прозрачных материалов могут возникать полости, являющиеся следствием оптического пробоя поглощающих микронеоднородностей. Их объемная плотность может достигать значений $\sim 10^5$ см⁻³ и более [1]. До воздействия с помощью микроскопа дефекты не выявлялись.

Если вещество обладает высокой механической прочностью, полости не возникают, однако наблюдаются участки со значительными полями остаточных внутренних напряжений и, как следствие, локальными искажениями показателя преломления, что приводит к рассеянию лазерного излучения и переизлучению нагретых микронеоднородностей.

Для визуализации поглощающих включений в этом случае достаточно использования менее мощного излучения. Анализируя полученные с помощью тепловизионных камер изображения нагретых лазером поглощающих включений, можно производить оценку размеров микронеоднородностей, их количество и положение в объеме образца.

В работе использовалось лазерное излучение частотно-импульсного волноводного СО₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм, т. е. в области максимальной чувствительности тепловизора и прозрачности исследуемого материала, мощностью, подходящей для теплового нагрева микронеоднородностей, – до 1 Вт. Конструкция лазера позволяет перестраивать длительность импульса в диапазоне 30–300 мкс и частоту их повторения в диапазоне 10–300 Гц.

Достоинством предлагаемой технологии является также возможность визуализации поглощающих дефектов в материалах, непрозрачных в видимой области.

В работе описана установка для исследования дефектов и продемонстрированы ее возможности при исследовании дефектов в монокристалле германия.

Данная неразрушающая бесконтактная лазерно-тепловизионная дефектоскопия прозрачных материалов может быть использована для выявления дефектов ИК-оптики и особо чистых полупроводниковых материалов – участков с повышенной концентрацией малоразмерных дефектов структуры материала и примесей (так называемых кластеров), причем во многих случаях возможно выявление скоплений электрически нейтральных примесей, не выявляемых в принципе традиционно применяемыми электрофизическими методами.

Рогалин В. Е. Влияние поглощающих микронеоднородностей на оптическую стойкость щелочно-галоидных монокристаллов // Известия РАН. Сер. физ. – 2012. – Т. 76, № 11. – С. 1346–1358.

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ВЫХОДНЫХ ОКОН ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ С НЕУСТОЙЧИВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Рогожин М.В.¹, Рогалин В.Е.^{2,3}, Крымский М.И.^{1,2}, Каплунов И.А.³

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)
д. 9, Институтский переулок, Долгопрудный, 141701, Москва, Российская Федерация,

²АО «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»,
95, Волоколамское ш., Москва, 125424, Российская Федерация,

e-mail: v-rogalin@mail.ru

³Тверской государственный университет,
33, ул. Желябова, Тверь, 170100, Российская Федерация,

e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

Рассмотрен метод повышения ресурса выходных окон высокомошных лазеров с неустойчивым резонатором. Для них характерен кольцевой вывод излучения, и центральная область окна не подвергается воздействию излучения. Тогда она может быть изготовлена из другого, более дешевого и механически прочного материала. Расчеты проведены на примере СО₂-лазера с выходным окном из ZnSe, в центральной области которого размещается криоаккумулятор с элементом Пельтье. Данный способ позволяет термостабилизировать поверхность центральной области окна в течение достаточно длительного промежутка времени, не требуя дополнительного подвода хладагента.

Разработана математическая модель и проведены расчеты максимально допустимой мощности лазера, как для случаев непрерывной работы при мощности 10 кВт, так и кратковременной мультикиловаттной, длительностью 10 с. Рассмотрено влияние нагрева окна на расходимость выходного излучения, являющуюся ключевым параметром работы лазера.

Показано, что для непрерывного режима работы окна с периферийным жидкостным охлаждением использование криоаккумулятора позволяет повысить ресурс мощности выходного излучения с расходимостью, близкой к дифракционной. Для случая кратковременной работы более целесообразно подогревать центральную область. В этом случае происходит сглаживание профиля dn/dT за счет нагрева центральной области.

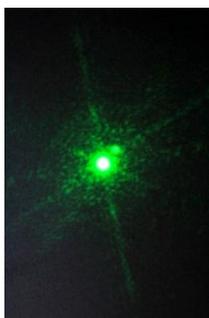
РОЛЬ НАНОВЫСТУПОВ В ПОЯВЛЕНИИ БЛИКОВ НА ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА

Колесников А.И., Каплунов И.А., Ляхова М.Б., Третьяков С.А., Семенова Е.М.,
Иванов А.М., Айдинян Н.В., Воронцов М.С., Рыбина С.С., Иванова П.В.

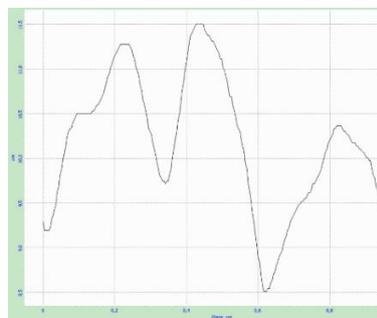
*Тверской государственный университет,
33, ул. Желябова, Тверь, 170100, Российская Федерация,
e-mail: Kaplunov.IA@tversu.ru*

При освещении отполированных по максимальным классам чистоты плоских поверхностей монокристаллов германия в отраженном лазерном свете иногда наблюдаются яркие, узкие и длинные полосы-блики (рисунок *а*), направления которых соответствуют определенным кристаллографическим ориентациям. Они не связаны с поляризацией света, с распределением интенсивности по сечению лазерного пучка и при вращении поворачиваются вместе с кристаллом. Это нежелательное явление совсем недавно привлекло внимание исследователей и подробно не изучено.

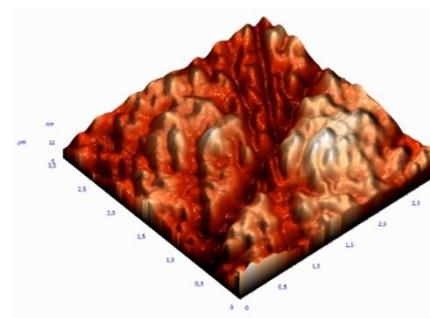
Цель настоящей работы – поиск элементов рельефа полированных поверхностей германия, приводящих к появлению бликов.



а



б



в

Блики в отраженном полированным кристаллом германия лазерном свете (*а*);
3D-изображение участка поверхности кристалла германия (*б*) и профиль его поверхности
с нанонеровностями (*в*), полученные методом атомно-силовой микроскопии

Микрорельеф и нанорельеф полированных поверхностей германия, совпадающих с плоскостями $\{111\}$, изучен с помощью методов оптической микроскопии (Axiovert 200MAT) и атомно-силовой микроскопии (Solver P47 и Solver Next). Никаких закономерно расположенных неровностей макроскопических и микроскопических размеров на поверхностях не выявлено. Однако обнаруженные неровности наноразмеров (высотой не более 10–20 нм) (рисунок *б*, *в*) имеют преимущественные ориентации площадок, отвечающие плоскостям спайности кристаллов германия $\{111\}$. Они играют роль нанозеркал, которые и дают блики отраженного лазерного света в направлениях, углы между которым составляют 60° , что соответствует углам между проекциями нормалей к граням тетраэдра.

В результате исследований сделаны следующие выводы. Блики в отраженном лазерном свете видимого диапазона связаны с наличием на полированных гранях монокристаллов германия неровностей наноразмеров, имеющих плоские участки, соответствующие плоскостям спайности. Таким образом, после полировки абразивными материалами, минимальные частицы, которых имеют размеры порядка 0,5 мкм, поверхности почти целиком представлены сколами по спайности.

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ НА РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ

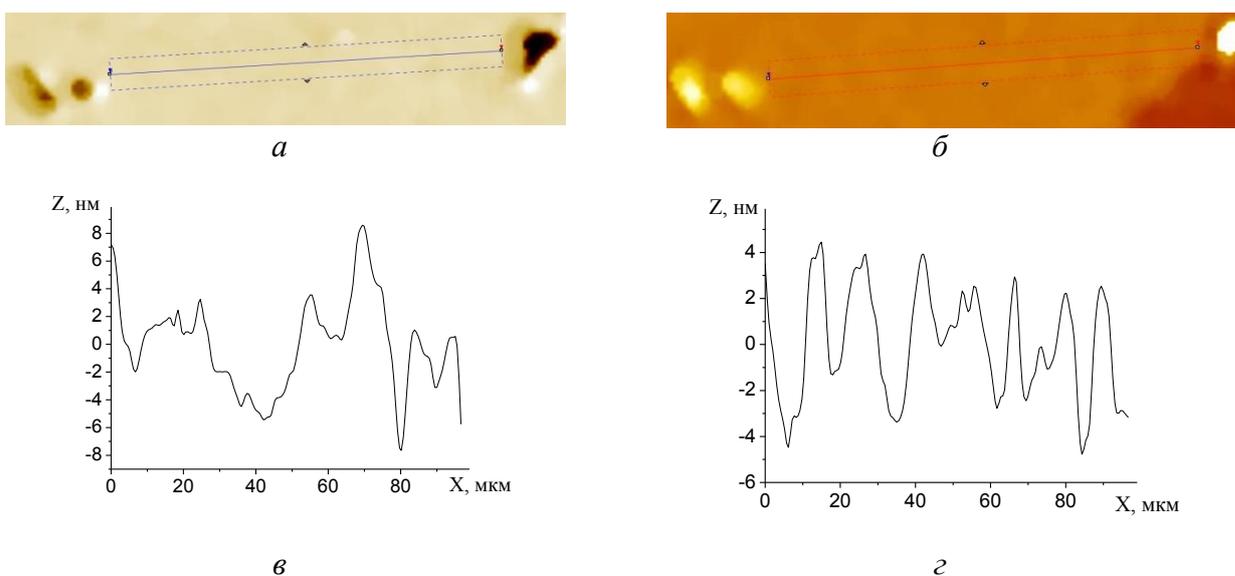
Колесников А.И., Третьяков С.А., Каплунов И.А., Иванова А.И.,
Воронцов М.С., Молчанов С.В., Слободянюк К.А.

Тверской государственный университет, 33, ул. Желябова, 170100, Тверь, Российская Федерация,
e-mail: Kaplunov.IA@tversu.ru

Монокристаллы германия широко применяются в области ИК оптики. Параметры шероховатости оптических элементов из монокристаллов германия значительно влияют на пропускание и отражение ИК излучения. В процессе работы устройств оптические элементы нагреваются за счет поглощения и за счет нагрева от электронной оснастки приборов. Однако влияние нагрева в пределах рабочих температур на профиль поверхности недостаточно изучено и отражено.

Цель настоящей работы – сравнительные исследования профилей поверхностей германия при их нагреве от 25 до 65°C, а также расчет возможных изменений коэффициентов пропускания и отражения света, вызванных нагревом.

В экспериментах нагревательный элемент помещался на предметный столик интерференционного профилометра NanoMap WLI1000. Это позволило производить съемку и анализ одного и того же участка поверхности кристалла до и после нагрева без использования математических алгоритмов усреднения по параметрам шероховатости (рисунок).



Участок поверхности полированного германия до нагрева (а) и после нагрева (б).
2D-профили этих же участков до нагрева (в) и после нагрева (z)

Полученные профили были проанализированы с помощью программного обеспечения, моделирующего пропускание света через материал с неровной поверхностью и базирующегося на геометрикооптическом приближении. Модель показала значительное увеличение коэффициента отражения и, как следствие, уменьшение коэффициента пропускания, что было экспериментально подтверждено с помощью Фурье-спектрометра TENSOR-27.

В результате исследований получен следующий вывод. При нагреве монокристаллов германия происходит нелинейное расширение материала в приповерхностных слоях, что приводит к изменению индикатрисы отраженного и прошедшего электромагнитного излучения.

Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студенов В. И. Применение нанотехнологий в оптике: о возможности увеличения прозрачности и повышения поверхностной механической прочности материалов в УФ и ИК диапазонах спектра // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 2. – С. 57.

К ВОПРОСУ О РЕКОНСТРУКЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПЛАСТИНЫ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Келлер И.Э.^{1,2}, Петухов Д.С.^{1,2}, Трофимов В.Н.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН,
1, ул. Ак. Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: petuhovds@mail.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, пр. Комсомольский, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: tyn_perm@mail.ru

Предметом исследования является математическое описание формы и напряженно-деформированного состояния стальной пластины, подвергнутой односторонней дробеструйной обработке, его экспериментальное подтверждение и применение результатов для верификации методов реконструкции полей остаточных напряжений и деформаций по экспериментальным данным. Подобная пластина используется на производстве в качестве калибровочного образца для определения времени пневмодробеструйной обработки, необходимого для формирования в поверхностном слое обрабатываемого изделия сжимающих тангенциальных остаточных напряжений заданной величины, а сам метод калибровки оказывается удобным и довольно широко распространенным для различных способов поверхностно упрочняющей обработки. Источником остаточных напряжений в данном случае является пограничный слой пластических деформаций, наводимый рассматриваемым технологическим процессом. Для постановки задачи задается структура поля тензора пластических деформаций. Форма и напряженно-деформированное состояние упругой пластины с пограничным слоем пластических деформаций были рассчитаны численно, в результате чего были выявлены качественные особенности данных полей, ослаблены граничные условия задачи и сформулированы гипотезы о структуре решения соответствующей пространственной задачи теории упругости, которое далее было найдено аналитически. Показано, что в рамках приближения плоского напряженного состояния в поперечных направлениях результат точно соответствует формуле Давиденкова–Биргера, связывающей зависимость тангенциальной компоненты остаточных напряжений от координаты по толщине пластины с функцией прогибов. Получена явная формула для зависимости остаточной (пластической) деформации от координаты по толщине. Проанализированы источники погрешностей полученных выражений и способы их коррекции, проведен эксперимент по односторонней дробеструйной обработке калибровочной пластины, изготовленной из закаленной стали 65Г, для которой выполнено травление обработанной поверхности с измерением изменения стрелы прогиба (метод Н.Н. Давиденкова). С помощью полученных экспериментальных данных были численно реконструированы профили остаточных напряжений и деформаций с разумной точностью. Результат применим к широкому классу задач для упругих тел с упрочняющими покрытиями, а также имеет определенную методическую ценность для усовершенствования основ экспериментального исследования таких задач, позволяет изучать связь рассматриваемых полей в предельных случаях, верифицировать применение различных способов учета остаточных напряжений и деформаций при численных расчетах ресурса деталей машин с поверхностными упрочняющими покрытиями. Обсуждаемые соотношения обобщаются на тела с криволинейной границей.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 17-08-01085).

ПРЕДЕЛЬНАЯ КРИВАЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА: ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ И КРИТЕРИЯ ВЯЗКОГО РАЗРУШЕНИЯ

Казанцев А.В.¹, Келлер И.Э.^{1,2}, Петухов Д.С.^{1,2}, Трофимов В.Н.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, пр. Комсомольский, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: alexkazancev@bk.ru

²Институт механики сплошных сред УрО РАН,
1, ул. Ак. Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: kie@icmm.ru

Для обоснованного выбора определяющих уравнений материала при математическом моделировании процессов горячей и теплой обработки давлением тонколистовых металлических изделий с большой степенью вытяжки рассматриваются способы теоретического анализа и экспериментального подтверждения условий предельного деформирования материала. Внимание сконцентрировано на кривой предельного деформирования листового металла, на плоскости главных деформаций (одна из которых соответствует растяжению, а вторая может задавать растяжение или сжатие), характеристике локального состояния материала, отвечающей критическому росту локализации деформации. Локализация здесь понимается как локальное утонение листа и соответствует диффузной форме локализации, другие дефекты (полосы сдвига, образование трещин) развиваются из данного предельного состояния либо (образование складок и морщин) не являются локальными и требуют полной постановки задачи. Данная кривая, диктующая условия реализации того или иного технологического процесса, может быть теоретически предсказана в зависимости от определяющих уравнений пластичности, индикаторов критического состояния и начальных несовершенств. Для этого рассматриваются возможности схемы Марциньяка–Куцзинского, в рамках которой образец имеет две зоны однородной деформации и допускает аналитическое сведение задачи к системе нескольких обыкновенных дифференциальных уравнений, решаемых численно. Экспериментальный метод предусматривает испытание вдавливанием пуансона со сферическим или цилиндрическим наконечником в образец, вырубленный из листа, который в зависимости от глубины боковых вырезов может обеспечивать растяжение либо сжатие образца в поперечном направлении. Оба подхода анализируются в работе в качестве инструментов выбора и экспериментальной верификации модели материала и индикатора предельного состояния, решающих сложную методическую проблему идентификации математической модели по достаточно нестандартным экспериментам, сопровождающимся локализацией деформации. С применением схемы Марциньяка–Куцзинского выполнен анализ ряда критериев текучести анизотропного листового материала, законов упрочнения и моделей повреждаемости, а также критериев предельного состояния на кривую предельного деформирования, для чего был разработан собственный алгоритм. Экспериментальные стандартные схемы испытания по методам Хейсика, Накадзимы и Марциньяка были реализованы численно в пакете программ LS-DYNA, данные которых для сравнения также были нанесены на плоскость главных деформаций. Обсуждается возможность интегрирования в схему Марциньяка–Куцзинского для каждой базовой жестко-пластической (склерономной) модели зависимости от температуры, скорости деформации и микроструктуры. Отмечено существенное ограничение теоретической схемы Марциньяка–Куцзинского рамками пропорционального изменения главных деформаций в образце вне и внутри зоны локализации деформации, а также то, что она не приспособлена для определения предельных свойств металлов, деформируемых в условиях деформационного разупрочнения (алюминиевые, титановые сплавы и некоторые стали при температурах динамической рекристаллизации). Обсуждается вопрос описания эволюции анизотропных свойств пластичности и разрушения вследствие анизотропного накопления поврежденности.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Пермского края (проект № 17-48-590310-а).

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА НА ОСНОВЕ ВИХРЕТОКОВЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ УСТАЛОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ

Мишакин В.В.^{1,2}, Гончар А.В.¹, Ключников В.А.¹, Курашкин К.В.¹

¹*Институт проблем машиностроения РАН –
филиал ФГБНУ «Федерального исследовательского центра Института прикладной физики РАН»,
85, Белинского, Нижний Новгород, 603024, Российская Федерация,
e-mail: imndt31@mts-nn.ru*

²*ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева»,
24, Минина, Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация,
e-mail: imndt31@mts-nn.ru*

Цель работы – создания алгоритма оценки усталостной поврежденности сталей аустенитного класса на базе акустических и вихретоковых измерений.

Приведены кинетические кривые изменения процентного содержания магнитной фазы (α' -мартенсита) и изменения коэффициента Пуассона при усталостном разрушении метастабильной стали аустенитного класса 08X18H10T, широко применяемой в ядерной, химической промышленности, машинах и механизмах, работающих в условиях Крайнего Севера. Коэффициент Пуассона измерялся акустическим методом. Содержание магнитной фазы контролировалось вихретоковым методом.

Сочетание магнитных и акустических измерений позволяет выделить влияние микроповрежденности на коэффициент Пуассона и по данным акустических измерений оценить исчерпание ресурса материала до появления макротрещины.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по проекту RFMEFI58017X0012.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н9Т УЛЬТРАЗВУКОВЫМ И ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДАМИ

Ключников В.А., Мишакин В.В., Гончар А.В.

*Институт проблем машиностроения РАН –
филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН»,
85, ул. Белинского, г. Н. Новгород, 603024, Российская Федерация,
e-mail: imndt31@mts-nn.ru*

Большинство неразъемных соединений в металлических конструкциях выполнены с помощью сварки. Особенностью материала сварных соединений, как правило, является сильная структурная неоднородность. В зоне термического влияния (ЗТВ), как правило, наблюдается градиент упругих, прочностных и пластических свойств, что затрудняет расчет деформаций в локальных зонах сварного соединения. Оперативная оценка методами неразрушающего контроля величины пластической деформации металла сварных соединений является на сегодня актуальной задачей.

Эксплуатационные свойства изделий, изготовленных из аустенитных сталей, в значительной степени зависят от структуры и фазового состава, которые могут изменяться в процессе эксплуатации изделия. Изменение свойств аустенитных сталей в результате пластического деформирования связано не только с изменением дислокационной структуры, кристаллографической текстуры, накоплением микроповреждений, но и с активным изменением фазового состава – формированием α' -мартенсита, обладающего сильными магнитными свойствами и отличными от матрицы упругими модулями. Это необходимо учитывать при исследовании стали методами неразрушающего контроля.

Наличие структурной неоднородности в ЗТВ приводит к неравномерному распределению акустических характеристик и электромагнитных свойств материала сварного соединения.

Цель работы – исследование влияния пластического деформирования сварного соединения, изготовленного из стали 12Х18Н9Т, на электромагнитные, магнитные и акустические характеристики материала.

Исследования проводились на сварных образцах из аустенитной стали 12Х18Н9Т. Сварное соединение было выполнено в середине образца ручной аргоно-дуговой сваркой встык. Длина рабочей зоны составляла 200 мм, ширина 20 мм, толщина 6 мм. Проводилось ступенчатое одноосное растяжение при комнатной температуре. Исследования акустическим, вихретоковым и пондеромоторным методами выполнялись до испытаний и после каждого этапа нагружения.

Изменение электромагнитных свойств при статическом одноосном растяжении сварного соединения из аустенитной стали 12Х18Н9Т контролировалось вихретоковым и пондеромоторным методами в зоне основного материала (ОМ) и зоне термического влияния (ЗТВ). Было получено усредненное по зонам образца значение показаний вихретокового дефектоскопа $\xi_{\text{ср}}$, пропорциональное детектированному напряжению с преобразователя, и изменение магнитных свойств материала, выражаемое через силу отрыва неодимового магнита F , связанное с образованием новой фазы.

Было установлено, что на начальном этапе деформирования аустенитной стали происходит существенное изменение электрических свойств материала, которое не связано с образованием новой фазы. Изменение электрических свойств материала на начальном этапе пластического деформирования может быть связано с процессом изменения дислокационной структуры, кристаллографической текстуры, накоплением микроповреждений. Интенсивное образование α' -мартенсита на последующих этапах деформирования оказывает основное влияние на электромагнитные свойства стали. Изменения электромагнитных характеристик связаны как с увеличением объемной доли магнитной фазы, так и с изменением электриче-

ского сопротивления при накоплении микроповреждений на поверхности и приповерхностном слое деформируемого металла.

Данные, полученные с помощью ультразвуковых измерений, показали возможность мониторинга состояния исследуемого материала. Была получена линейная связь с высоким коэффициентом корреляции соотношения акустических параметров с изменением ресурса пластичности.

Было установлено, что по данным ультразвуковых измерений можно оценить степень деградации материала и рассчитать исчерпание ресурса пластичности в процессе пластического деформирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60155 мол_а_дк.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА И РАЗМЕРА СТРУКТУРНОГО ДЕФЕКТА ПО ИЗМЕНЕНИЮ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ВИБРАЦИОННЫХ ОТКЛИКОВ КОНСТРУКЦИИ

Кокуров А.М., Татусь Н.А.

ФГБУН ИМАШ РАН, Россия, д.4, ул. Бардина, 119334, Москва, Российская Федерация,
e-mail: and-kokurov@yandex.ru, nikalet@mail.ru

В связи с интенсивным внедрением композитных материалов в силовые элементы конструкции техники гражданского и военного назначения возникает ряд вопросов, связанных с оценкой влияния различных видов дефектов и повреждений, как на прочность, так и на ресурс изделия. В настоящее время активно развиваются методики определения прочностных характеристик конструкций с возникшими в процессе изготовления и эксплуатации дефектами структуры материала, с использованием результатов оценки текущего состояния методами неразрушающего контроля. В связи с этим особый интерес представляет возможность обнаружения повреждения и идентификацию соответствующего ему механизма разрушения по изменению деформационного и вибрационного откликов на малое тестирующее воздействие.

С целью создания методики оценки прочности и ресурса конструкции разработан подход, заключающийся в комбинированном применении высокоточных когерентно-оптических методов, таких как голографическая и спекл-интерферометрия с конечно-элементным моделированием процессов разрушения, позволяющий эффективно и точно определить вид и размер структурного повреждения по изменению деформационного и вибрационного откликов рассматриваемого объекта.

Проведение экспериментально-расчетного исследования можно условно разделить на несколько основных этапов. На первом шаге необходимо определить поля деформаций, соответствующие исходному (без повреждений) состоянию объекта. Затем выполняется исследование конструкции со структурным дефектом. По отклику в виде трансформации типового спектра реакций, выражающейся в изменении частот и форм колебаний, как отдельных элементов, так и объекта в целом, определяются геометрические и механические характеристики области повреждения. Далее, определенные при статическом и вибрационном нагружении деформационные характеристики конструкции передаются в расчетную модель. На следующем этапе проводятся моделирование и расчет, которые позволяют по исходной и расширенной информации, полученной при диагностике состояния объекта с регистрацией спектра реакций, выполнить численное определение вида дефекта и наиболее вероятный механизм разрушения.

Возможность определения геометрических характеристик области повреждения и вида разрушения демонстрируется на примере исследования виброповедения типичной конструкции – композитной подкрепленной панели (обшивки со стрингерами). В ходе вычислений определялись значения собственных частот и соответствующие им формы колебаний панели. В качестве характерных видов разрушения панели принимались следующие: отслоение стрингера от обшивки, разрушение стрингера (при целой обшивке), разрушение обшивки (при целых стрингерах), разрушение панели (стрингеров и обшивки).

Комплексный анализ полученных результатов позволил сделать выводы о влиянии развивающегося повреждения на формы и частоты колебаний панели, а также о закономерностях изменения вибрационного отклика конструкции в зависимости от размера и характера повреждения. Приведены рекомендации по выбору наиболее информативных форм колебаний объекта для различных характерных расположений в нем поврежденной области. Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность применения предложенной методики исследования для решения задач оценки прочности и ресурса композитных изделий с различными видами повреждений по результатам анализа изменения деформационного и вибрационного откликов, определенных методами неразрушающего контроля.

Работа поддержана грантом РНФ № 14-19-00776-П.

ДИАГНОСТИКА – ОСНОВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Кондратьев И.М., Шитов А.М.

*ИМАШ им. А.А. Благодравова РАН, 4, Малый Харитоньевский, Москва, 101990, Российская Федерация,
e-mail: kiimash@yandex.ru, shitov_am@mail.ru*

В докладе изложены результаты исследований и разработок, целью которых было создание методики оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса узлов металлорежущих станков.

Актуальность задачи оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса, как отдельных узлов, так и станка в целом напрямую связаны с работоспособностью станочного парка предприятия и определяет возможность решать оперативные и плановые производственные задания. Знание остаточного ресурса важно также для выбора обоснованного межремонтного периода и сроков диагностических проверок.

В основу данной методики положены процедуры и алгоритмы диагностического мониторинга технического состояния узлов станков. При этом техническое состояние узла оценивается набором диагностических параметров, часть из которых указана в технической документации или получена на основе обработки статистической информации, полученной в ходе эксплуатации, например с использованием анализа дерева отказов узла.

При работоспособном состоянии узла все его параметры находятся в допустимых пределах, а выход хотя бы одного из параметров за границы диапазона допустимых значений свидетельствует об отказе, т.е. потере работоспособности. При этом полностью исчерпаны технический и моторесурс.

Для определения остаточного ресурса узлов станков необходимо определить предельно допустимые состояния. Для решения этой задачи предложено использовать два взаимно дополняющих источника информации. Первый – это накопление, статистическая обработка и анализ экспериментальных данных, второй – математическое моделирование и расчет необходимых нормативных значений по результатам моделирования.

Поскольку диагностические параметры имеют различную физическую природу, то для сравнения остаточных ресурсов станка по разным параметрам они должны быть приведены к единому показателю, который может быть выражен в процентах от предельно допустимого значения или в часах.

Для определения остаточного моторесурса необходимо знать среднюю скорость деградации диагностируемых параметров за период использованного моторесурса; для этого разработаны математические модели расчета остаточного ресурса с использованием скорости деградации диагностического параметра.

Текущие значения контролируемых параметров устанавливаются с помощью измерений (с использованием датчиков) или расчетов (на основе математических моделей рабочих процессов).

Алгоритм, реализующий предлагаемую методику, укрупненно выглядит следующим образом. Для анализируемого узла станка задается набор контролируемых параметров, определяются границы их допустимых значений, подбираются измерительные датчики и определяются места их установки на узле, проводятся измерения всех параметров и полученные значения сравниваются с допустимыми, определяется работоспособность узла и остаточный моторесурс.

Алгоритм и основанное на нем программное обеспечение было опробовано для различных узлов станков, это может быть проиллюстрировано на примере шпиндельного узла (ШУ).

Выбор шпиндельного узла для демонстрации методики определяется тем обстоятельством, что он является одним из наиболее важных узлов станка, поскольку от его функционирования зависит качество получаемых деталей. А кроме того он подвергается наибольшему

нагрузкам при работе станка, и его ресурс ШУ фактически является определяющим для ресурса станка в целом.

Остаточный ресурс ШУ определяется по результатам оценки таких параметров как уровень вибрации, температура подшипниковых узлов и жесткость ШУ. Для каждого диагностического параметра разработана оригинальная процедура контроля и оценки, которая позволяет определить техническое состояние ШУ и остаточный ресурс.

Эти же параметры определяют остаточный ресурс и других ответственных узлов станка (шариковинтовые механизмы, редукторы, коробки передач, инструментальные магазины и др.).

Оценка остаточного ресурса узлов станков в условиях многостаночного производства может быть реализована на основе диагностического мониторинга, а результатом этого является отсутствие внезапных отказов и аварийного состояния оборудования. Это позволяет контролировать текущее состояние станков, обоснованно определять сроки и содержание ремонтных работ и проводить оценку качества их выполнения, уменьшить затраты финансовых средств и труда на эксплуатацию оборудования, продлить межремонтный период и срок службы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАСЕТОК ГРАНИЦ НОВЫХ ЗЕРЕН В ПРОЦЕССЕ СТАТИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Кондратьев Н.С.¹, Трусов П.В.²

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, пр. Комсомольский, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: kondratevns@gmail.com, tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Мезо- и микроструктура поликристаллов, претерпевающая существенные изменения при термомеханической обработке, определяет физико-механические свойства материалов и рабочие характеристики готовых изделий [1]. Моделирование эволюции внутренней структуры является эффективным способом разработки новых методов и подходов получения материалов и изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками. Вследствие этого в последние десятилетия повышенный интерес в механике деформируемого твердого тела вызывают физические модели, основанные на явном рассмотрении носителей и механизмов неупругого деформирования [1]. В таких моделях для корректного описания действующих механизмов пластичности необходимо введение нескольких масштабных уровней. Многоуровневый подход, основанный на физических теориях пластичности, оперирует описанием механизмов, присущих широким классам материалов, поэтому может применяться для проектирования новых материалов и конструкций [2]. Ранее в работе [3] была предложена модель для описания статической рекристаллизации по механизму миграции исходно существующих большеугловых зерен за счет накопленной при пластической деформации разности запасенной (на микродефектах) энергии соседних зерен. Предложен способ выделения фасеток границ новых (рекристаллизованных) зерен, основанный на решении задачи минимизации межзеренной энергии фасеток новой границы. В случае рассматриваемого механизма рекристаллизации можно считать, что одна площадка рекристаллизованного зерна и соответствующая ей нормаль фасетки границы определена и совпадает с исходной большеугловой границей зародыша рекристаллизации (субзерна), остальные определяются при решении задачи минимизации энергии фасеток межзеренной границы. Для решения этой задачи за основу был выбран метод Нелдера–Мида (метод деформируемого многогранника). В данном методе не используется градиент, и он может применяться к негладким функциям. Была проведена проверка численной реализации данного алгоритма на гладких выпуклых функциях двух переменных. Рассмотрена тестовая задача минимизации межзеренной энергии, последняя определялась способом, изложенным в [4]. Для двух кристаллитов с гранецентрированной решеткой задавалась двойниковая разориентация решеток – поворот одной из решеток на угол ρ вокруг нормали габитусной плоскости (111). Нормаль фасетки границы \mathbf{N} полагалась неизвестной, ее необходимо было найти из условия минимальности относительной межзеренной энергии. В результате была найдена искомая нормаль, которая соответствует нормали габитусной плоскости (111). Полученные результаты согласуются с данными, указывающими на минимальность энергии двойниковой границы [5]. Следует отметить, что поиск глобального минимума рассматриваемой функции межзеренной энергии осложняется наличием множества ее локальных минимумов. Для гарантированного определения абсолютного минимума область определения функции межзеренной энергии равномерным образом разбивалась на 128 треугольных симплекс-элементов в пространстве углов, задающих направление нормали. Используемый подход выделения фасеток границ рекристаллизованных зерен является перспективным с точки зрения учета и рассмотрения специальных границ с пониженной энергией, количество которых растет в процессе рекристаллизации [5], однако является требовательным с точки зрения вычислительных затрат.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60002 мол_а_дк.

Литература

1. Трусов П. В., Волегов П. С., Кондратьев Н. С. Физические теории пластичности. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.
2. Multilevel models of inelastic deformation of materials and their application for description of internal structure evolution / P. V. Trusov, A. I. Shveykin, E. S. Nechaeva, P. S. Volegov // *Physical Mesomechanics*. – 2012. – Vol. 15, no. 3–4. – P. 155–175.
3. Трусов П. В., Кондратьев Н. С. Двухуровневая упруговязкопластическая модель: применение к анализу эволюции зеренной структуры при статической рекристаллизации // *Физическая мезомеханика*. – 2018 (в печати).
4. Kondratev N. S., Trusov P. V. Calculation of the intergranular energy in two-level physical models for describing thermomechanical processing of polycrystals with account for discontinuous dynamic recrystallization // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2016. – Vol. 7, no. 2.
5. Recrystallization and related annealing phenomena / A. Rollett, F. J. Humphreys, G. S. Rohrer, M. Hatherly. – Oxford : Elsevier, 2004. – 574 p.

БИОНИЧЕСКИЙ ДИЗАЙН СТРУКТУРЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Коновалекно И.С., Шилько Е.В.

*ИФПМ СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: igkon@ispms.tsc.ru*

Эффективным способом повышения механических характеристик поверхностных слоев спеченных металлокерамических композиционных материалов является их наноструктурирование посредством высокоэнергетического импульсного электронно-пучкового облучения в плазме инертных газов. Помимо измельчения структурных элементов, оно приводит к формированию в поверхностных слоях градиента структуры и механических свойств по глубине.

Характерные размеры упрочняющих включений, их форма и распределение, механические характеристики компонентов в модифицированных поверхностных слоях зависят от используемого инертного газа и параметров облучения. Управляя ими, можно для конкретного композиционного материала реализовывать значительное количество комбинаций структуры и механических свойств. В то же время вклад каждого из ключевых параметров структуры поверхностных слоев не в полной мере изучен и требует отдельного параметрического анализа, что обусловило его проведение на основе численного моделирования.

Цель настоящей работы – компьютерное изучение влияния ключевых параметров внутренней структуры поверхностных слоев металлокерамических композитов, модифицированных электронно-пучковым облучением, на эффективные механические свойства поверхностных слоев, включая прочность и вязкость разрушения, а также на особенности деформации и разрушения. Исследования проведены на примере металлокерамического композита TiC-NiCr (50:50).

Результаты моделирования показали, что основными факторами, определяющими высокие механические свойства поверхностных слоев металлокерамических композитов, являются изменение формы и размеров керамических частиц, типа их упаковки, объемной концентрации, а также механических характеристик компонентов.

Показано, что изменение формы упрочняющих частиц и типа их упаковки при высокоэнергетической обработке поверхностных слоев качественно изменяет характер распределения сдвиговых напряжений от дисперсного к каркасному. Это обуславливает повышение вязкости разрушения, пределов текучести и прочности на величину до 15–20 %. По результатам исследований определены размеры и соотношения размеров керамических частиц обеспечивающие оптимальное сочетание значений прочности и вязкости разрушения модифицированных поверхностных слоев.

Результаты моделирования показали большое влияние величины прочности керамических включений (отражающей степень их структурного совершенства) на предел упругости, коэффициент деформационного упрочнения, прочность и вязкость разрушения модифицированных поверхностных слоев. Так, возрастание прочности керамических включений приводит к увеличению прочности на сжатие модифицированного поверхностного слоя до 1,5 раз при одновременном возрастании протяженности стадии деформационного упрочнения в 2–3 раза. При этом имеет место кратное увеличение работы разрушения.

Важно отметить, что выявленные тенденции реализованы во многих природных материалах. Ярким примером таких материалов является раковина *Haliothis*.

В поперечном сечении этого природного композита, построенного по принципу «кирпича и раствора», прослеживается структура, подобная полученной у металлокерамического композита, а именно – вытянутые сечения арагонитовых кирпичиков, соответствующие ориентированным столбчатым включениям TiC, а также тонкие органические слои между кирпичиками, соответствующие прослойкам связующего NiCr. Более того, раковина и композит

характеризуются сопоставимыми значениями концентрации керамической компоненты и соотношения толщин упрочняющих частиц и вязких прослоек.

Однозначно прослеживается аналогия механических свойств компонентов и механизмов повышения вязкости разрушения реализуемых в металлокерамическом композите и бионических материалах. Так, в обоих рассматриваемых материалах упрочняющие элементы почти не разрушаются, а большая часть повреждений и трещин при нагружении образуется и развивается в мягкой органической прослойке и на интерфейсах. Механизмами повышения энергии разрушения во всех случаях являются «затупление» трещины в мягком материале прослоек, а также ее «отклонение» структурными элементами, в результате чего путь и энергия, требуемая для развития трещины, существенно увеличивается.

Результаты исследования показали широкие перспективы «бионического» компьютерного дизайна внутренней структуры поверхностных слоев металлокерамических композиционных материалов, основанного на заимствовании принципов организации внутренней структуры природных материалов с высокой прочностью и вязкостью разрушения.

Работа выполнена в рамках Программы III.23 фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА АМГ6/10 % SiC МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Коновалов Д.А., Смирнова Е.О., Смирнов А.С.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: satterkein@yandex.ru*

В настоящее время актуальным вопросом является создание материалов с высокими удельными свойствами. К таким материалам относятся металломатричные композиты. Они представляют собой сложные структуры, состоящие из матрицы и армирующего наполнителя с четкой границей раздела между ними. Современный дизайн металломатричных композитов базируется на компьютерном моделировании, который позволяет на стадии проектирования прогнозировать физико-механические и функциональные свойства нового материала. Поскольку металломатричные композиты представляют собой существенно структурно-неоднородную среду на микроуровне, то дизайн композитов предполагает моделирование свойств на микроуровне внутри представительного объема. Корректный выбор размеров представительного объема в значительной степени влияет на правильность проведения дизайна композитов. Для структурно-неоднородных материалов размер представительного объема определяют экспериментальным или расчетным методом. Суть расчетного метода заключается в том, что в расчетной модели размеры представительного объема выбираются из парадигмы отсутствия влияния увеличения числа носителей рассматриваемых механизмов процесса на анализируемые свойства. В экспериментальных методах используется та же парадигма, что и в расчетном методе, однако анализируется либо реальное распределение носителей исследуемых свойств, либо изучается влияние размеров образца на интересующие свойства материала. Для конструкционных металломатричных композитов главным параметром являются механические свойства. В результате выбор размеров представительного объема должен быть основан на парадигме выбора представительного объема, связанной с механическими свойствами. В металломатричных композитах матрица и армирующие частицы имеют микроскопические размеры, поэтому размеры представительного объема как правило тоже лежат в микроуровневом диапазоне.

Механические свойства композита определяются ансамблем взаимодействия частиц наполнителя, матрицы и их связями. В результате выбор размеров представительного объема необходимо проводить на основе механических испытаний. Наиболее корректным методом испытаний на микроуровне являются испытания на сжатие, растяжение и кручение. Данные испытания при современном развитии экспериментальной техники проводятся в колоннах микроскопов, оборудованных приставкой для проведения механических испытаний и ионной пушкой, предназначенной для выжигания произвольных форм в материалах. Однако такое оборудование является достаточно дорогим и находится в распоряжении малого количества исследовательских институтов. В результате для определения представительного объема в металломатричном композите АМг6/10 % SiC было использовано нано-, микро- и макрокинетическое индентирование индентером Берковича. На основе данных испытаний было определено, что представительный объем, описываемый кубом, должен иметь длину ребра 80 мкм. Разброс механических свойств, характеризуемый коэффициентом вариации, для такого представительного объема составил 2,5 %, что является приемлемым для инженерных расчетов.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-19-01358) в части разработки методики определения представительного объема ММК; РФФИ (грант № 16-08-00160) в части определения представительного объема ММК АМг6/10% SiC, а также по плану работ по теме № 0391-2016-0001 ИМАШ УрО РАН в части определения представительных объемов ММК для моделирования реологического поведения композитов.

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФИНИШНОГО ПОЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ НАНОШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Королева Л.Ф.

*Институт машиноведения Уральского отделения РАН, 620049,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: lq@imach.uran.ru*

Известно, что процесс полирования представляет собой финишную операцию обработки поверхности металла и является комплексным взаимодействием обрабатываемого материала, инструмента или полировальника, компонентов полировальной пасты и кислорода воздушной среды. Полирование с использованием дисперсных абразивных материалов можно представить как совокупность многих процессов: механического, адсорбционного, адгезионного и окисления поверхностного слоя. Известны три основные концепции процесса полирования твердых тел.

Первая концепция определяет процесс как скоростное массовое микрорезание неровностей поверхности твердых тел большим числом мельчайших шлифующих зерен с высокой интенсивностью съема в единицу времени.

Следующая теория полирования предпочитает преимущественное значение локальным пластическим деформациям. По определению Ребиндера, полирование поверхностей металлических изделий относится к процессам обработки давлением, когда под воздействием внешних сил в слоях, прилегающих к поверхности, возникает течение металла, приводящее к сообщению поверхности предельной гладкости. Введение поверхностно-активных веществ, являющихся адсорбционными пластификаторами металла, способствует снижению шероховатости трущихся поверхностей, ускоряя сам процесс и повышая качество полирования.

Третья теория полирования твердых тел, в основном неметаллических, механохимическая, изначально была предложена Гребенщиковым, а в дальнейшем развита Ребиндером и его учениками, связана с сорбционной механохимией. По теории сорбционной механохимии образование полированной поверхности происходит в результате срыва зернами абразивного порошка пленки поверхностного слоя, возникающего в процессе сорбции и химического действия смачивающей жидкости на поверхность стекла, при этом механосорбционная активация облегчает деформацию и механическое разрушение в адсорбированном слое.

Процесс полирования металлов отличается от полирования неметаллических тел. Нами предлагается механохимическая концепция финишного полирования металлов с применением трибохимически активных абразивных порошковых материалов. В этой работе с позиций механохимии (трибохимии) изложены результаты исследований процесса полирования закаленной стали с аустенитно-мартенситной структурой и цветных металлов. Выявлены механохимические особенности полирования металлов.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ, ДИФФУЗИОННЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ CoCrFeMnNi

Корчуганов А.В., Луценко И.С.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: avkor@ispms.ru*

Изучение структуры, физических свойств и поведения высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) при термических и механических воздействиях является одной из самых актуальных тем современного материаловедения. Это обусловлено уникальным комплексом свойств ВЭС, который в большой степени определяется их многокомпонентным составом. Как правило, такие сплавы состоят из 5 или более химических элементов. Согласно термодинамическим принципам, несмотря на сложный химический состав ВЭС может быть однофазным твердым раствором, если смешивать элементы сплава в равных долях. Это также является немаловажным для формирования превосходных свойств сплава. В то же время многие исследования показывают, что ВЭС с неэквиатомным составом также остаются стабильными и часто обладают лучшими свойствами. Поэтому поиск новых стехиометрических составов ВЭС является актуальной материаловедческой задачей. Следует отметить, что наряду с трудоемкими и дорогостоящими экспериментальными исследованиями компьютерное моделирование является эффективным инструментом, который позволяет быстро обрабатывать большие объемы информации и определять оптимальный химический состав ВЭС, соответствующий требуемым свойствам.

Цель работы – изучение механических, диффузионных и термических свойств и установление влияния на них концентрации химических элементов перспективного ВЭС CoCrFeMnNi. Для этого было проведено компьютерное моделирование на основе совместного использования методов Монте-Карло и молекулярной динамики. Исследуемые образцы имели форму куба со сторонами 10 параметров ГЦК-решетки, вдоль них использовались периодические граничные условия. Межатомное взаимодействие в CoCrFeMnNi описывалось многочастичными потенциалами, построенными в рамках метода погруженного атома. Равновесное распределение химических элементов в моделируемом ВЭС формировалось с использованием Монте-Карло алгоритма. Согласно ему, атомы двух разных сортов меняются местами с вероятностью, определяемой температурой и потенциальными барьерами. Полученные образцы были использованы для молекулярно-динамического расчета модулей объемного сжатия, энергий дефекта упаковки, температур плавления и коэффициентов диффузии ВЭС CoCrFeMnNi с различными стехиометрическими составами. Из проведенных исследований следует, что отклонение состава ВЭС CoCrFeMnNi от эквиатомного позволяет повысить его физико-механические, диффузионные и термические свойства, при этом сохраняя термодинамически-равновесную ГЦК-структуру сплава.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-10108).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ПАРОГРАВИТАЦИОННОГО ДРЕНАЖА

Костина А.А., Желнин М.С., Плехов О.А.

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
1, ул. Ак. Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: kostina@icmm.ru*

Истощение мирового запаса нефти, приводит к необходимости разработки различных способов и технологий, позволяющих повысить процесс нефтеотдачи пласта и расширить традиционные зоны нефтедобычи. В настоящее время, одним из наиболее эффективных методов повышения нефтеотдачи пластов является технология вытеснения нефти горячим паром. При этом для разработки залежей высоковязкой нефти часто используется метод парогравитационного дренажа, предполагающий бурение двух горизонтальных скважин, расположенных друг под другом. Верхняя скважина (паронагнетательная) предназначена для подачи горячего пара в продуктивный пласт. По мере снижения вязкости нефти увеличивается ее подвижность и под воздействием гравитационных сил нефть скапливается во второй (добывающей) скважине, откуда и происходит ее откачка на поверхность. Эффективное применение подобных методик, задействующих в процессе своего использования широкий класс взаимодействующих физических процессов, требует разработки адекватных математических моделей, позволяющих оценить рентабельность нефтедобычи при тех или иных условиях.

Паротепловое воздействие на продуктивный пласт сопровождается сложным взаимодействием механических, температурных и гидродинамических процессов. Увеличение температуры пористой среды вызывает термоупругое расширение, а также появление объемных деформаций (вертикального пучения), возникающих при продвижении фронта фазового перехода, что приводит к изменению пористости и проницаемости породы нефтеносного пласта. Изменение давления жидкости, содержащейся в порах, приводит к изменению эффективного напряжения сухого скелета, следовательно, и к изменению его деформации. При пространственно-неравномерном нагреве происходит падение горизонтальных напряжений в перекрывающих породах. При превышении давления закачиваемого пара величины горизонтальных напряжений, может возникнуть разрушение в вертикальном направлении, нарушающее целостность паровой камеры и приводящее к потерям тепла. Таким образом, адекватное описание напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород при паротепловом воздействии требует рассмотрения горной породы как иерархической системы с взаимодействующими температурными, механическими и гидродинамическими процессами.

Настоящая работа направлена на разработку связанной термомеханической модели, позволяющей описывать процессы фильтрации, фазовых переходов и изменение НДС массива пород, вызванного механическим и термическим воздействием. Рассматриваемая среда представляет собой многофазную систему «пар–массив–нефть–вода». Породный массив представляет собой пористую среду, заполненную двумя несмешивающимися жидкостями (водой и нефтью), а изменение вязкости жидкостей происходит вследствие изменения температуры. Решение модельной задачи разогрева продуктивного пласта, содержащего две горизонтально расположенные скважины, горячим паром в пороупругой постановке, позволило исследовать влияние технологических параметров процесса добычи нефти (объема закачиваемого пара, температуры пара) на эволюцию НДС пласта и определить оптимальные режимы разогрева пласта.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-4174.2018.1 и гранта РФФИ 18-31-00293 мол_а.

РАСЧЕТ НДС В СИСТЕМЕ ПКМ-ОПТИЧЕСКОЕ НЕПРЯМОЛИНЕЙНО РАСПОЛОЖЕННОЕ ВОЛОКНО

Сероваев Г.С., Кошелева Н.А.

*ИМСС УрО РАН, 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: serovae@icmm.ru, kosheleva.n@icmm.ru*

Растущий интерес к композитным материалам по сравнению с традиционными материалами обусловлен их улучшенными механическими свойствами, такими как высокая жесткость и прочность при низком весе. Из полимерных композиционных материалов (ПКМ) могут создаваться детали любых геометрических форм с различными схемами укладки, плетения, и большим выбором армирующих волокон и связующего. Благодаря этому анизотропные свойства ПКМ могут быть адаптированы непосредственно к требованиям конструкции.

Необходимость мониторинга многослойных композитов обусловлена вероятностью появления и развития дефектов в виде трещин, расслоений, разрывов волокон и т. д., представляющих угрозу безопасной эксплуатации. Стремление к сокращению расходов на техническое обслуживание в промышленных приложениях путем более эффективного использования ресурсов и материалов, повышение надежности и безопасной работы сложных конструкций из композитных материалов требует усовершенствования старых и создания новых систем мониторинга. Среди уже существующих возможных решений использование волоконно-оптических датчиков (ВОД) на брэгговских решетках становится все более популярным при проектировании систем мониторинга. К отличительным преимуществам оптических волокон можно отнести высокую чувствительность, устойчивость к электромагнитным помехам и долговечность. Также, благодаря их малым размерам, они могут быть размещены как на поверхности исследуемого объекта, так и встроены внутрь структуры ПКМ.

Использование ВОД в ПКМ позволяет отслеживать изменение механического состояния конструкции с помощью измерения деформаций и температуры в режиме реального времени. Некоторые проблемы, связанные с использованием ВОД в качестве датчиков деформации при измерении механического состояния композитных конструкций освещены в работах [1–3]. Настоящее исследование посвящено численному изучению соответствия деформаций реализующихся в оптическом волокне и деформаций в композитном материале при расположении оптического волокна на поверхности и при встраивании его в ПКМ. Анализируется распределение деформаций вдоль длины оптического волокна для двух моделей: модель с оптоволоком, размещенным на поверхности ПКМ; и при встроенном в структуру ПКМ оптоволоком. При этом оптическое волокно расположено не прямолинейно, а с изгибами. Данные изгибы могут появляться как случайно, в силу технологического процесса изготовления, так и умышленно, например, при организации схем расположения датчиков (розетки).

В результате проведенного исследования получены геометрические параметры зон несоответствия деформаций в зависимости от расположения оптоволокон. Данные результаты позволяют сделать выводы о характере переноса деформаций от композитного материала к оптическому волокну. Даются рекомендации об оптимальном расположении оптоволоконных линий с ВБР, углов их искривления, а так же рекомендации по закреплению оптических волокон на/в ПКМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-41-590684 p_a).

Литература

1. К вопросу об интеграции оптоволокна в ПКМ и измерении деформации материала с помощью волоконных брэгговских решеток / В. В. Махсидов, М. Ю. Федотов, А. М. Шиенок, М. А. Зуев // МКМК. – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 568–574.
2. Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: I. Parametric study / G. Luyckx, E. Voet, W. De Waele, J. Degrieck // Smart Mater. Struct. – 2010. – Vol. 19, no. 10. – P. 105017-1–105017-9. – DOI: 10.1088/0964-1726/19/10/105017.
3. Finite element prediction of resin pocket geometries around arbitrary inclusions in composites: Case study for an embedded optical fiber interrogator / N. Lammens, G. Luyckx, W. Van Paeppegem, J. Degrieck // Compos. Struct. – 2016. – Vol. 146. – P. 95–107.

РАЗВИТИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ

Красновейкин В.А., Коноваленко И.С.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: volodia74ms@yandex.ru*

В настоящее время возрастают требования к эффективности ракетно-космической техники, повысить которую можно за счет использования новых материалов. Они должны обладать высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, износостойкостью, быть пригодными для изготовления ответственных деталей и конструкций. Традиционно применяемые в этой области конструкционные сплавы и полимеры не всегда обладают комплексом требуемых физико-механических свойств. Одним из направлений получения материалов с необходимыми свойствами является изготовление деталей и конструкций из композитов на основе полимеров. Благодаря низкой массе полимеры являются привлекательным для применения в ракетно-космической технике, но обладают недостаточной прочностью. Повысить прочностные характеристики можно с помощью армирования углеродными волокнами. Ввод углеродных волокон в полимерную матрицу изменяет динамические характеристики материала, что необходимо учитывать при проектировании конструкций. В связи с этим необходим контроль динамических характеристик полученного материала, который может быть проведен различными методами. Наиболее эффективным из них является метод лазерной виброметрии. Он позволяет провести этот контроль бесконтактно, что дает преимущества в виде большей точности результатов и скорости их получения, по сравнению с использованием традиционных методов, в которых для измерений используются закрепляемые на объекте акселерометры.

Цель настоящей работы – развитие подхода бесконтактного высокоточного измерения динамических характеристик композиционных материалов при помощи метода лазерной виброметрии.

Возбуждение колебаний образца композиционного материала на основе углепластика проводились при помощи вибростола TMS 2075E, управляемого с генератора Aktakom AWG-4163. Образец с размерами 120×100×0,7 мм закреплялся консольно на вибростоле. В процессе колебаний проводилось сканирование композита лазерным доплеровским виброметром PSV-500-3D-NV фирмы «Polytec» в 5 точках, находящихся на одной линии, нормальной к консольному креплению. В разрабатываемом подходе предусматривается возможность выбора способов фиксации образца, подвода к нему колебаний, формы и параметров сигнала с целью максимального приближения характера динамической нагрузки к условиям работы исследуемого материала в реальной конструкции. Для приведения вибростола в движение использовался прямоугольный сигнал с периодом 5 с. Среднеквадратичная скорость вибростола варьировалась от 2,5 до 255 мм/с. Частотно-спектральный анализ проводился в диапазоне от 8 до 18 Гц. Исследование характера затухания колебаний композита проводилось на основе анализа зависимостей виброскоростей от времени, полученных для каждой из выбранных точек сканирования. При этом среднеквадратичная скорость в точке, максимально удаленной от места крепления образца, составила от 1,63 до 163 мм/с. В вышеуказанных точках сканирования также были получены амплитудно-частотные характеристики колебаний.

На основе анализа полученных данных может быть учтен возможный нелинейный характер изменения динамических характеристик материала (коэффициент демпфирования, логарифмический декремент затухания, добротность) в зависимости от интенсивности возбуждающих воздействий. Результаты, полученные с использованием развитого подхода, на образцах выбранного композиционного материала могут быть использованы для верификации его численных моделей, а также при создании и исследовании прототипов реальных конструкций из данного материала.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы, направление III.23.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ

Красновейкин В.А., Коноваленко И.С.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: volodia74ms@yandex.ru*

В ракетной и авиастроительной отрасли при разработке и создании современных образцов техники предъявляются повышенные требования к удельным прочностным характеристикам материалов и конструкций. Такими характеристиками, в частности, обладают композиционные материалы, на основе углепластиков. Они обладают рядом преимуществ перед традиционно используемыми алюминиевыми и титановыми сплавами. Однако помимо высоких удельных характеристик композиционные материалы должны обладать заданными динамическими характеристиками. Эти характеристики зависят от множества факторов, в частности внутренней структуры, величины и вида прикладываемых нагрузок. В связи с этим помимо контроля прочностных характеристик необходимо знать поведение материала при приложении динамических нагрузок. Данные исследования выполняются различными методами. Контактный метод измерения основан на использовании датчиков – акселерометров, крепящихся в различных местах конструкции. При таком способе измерений картина изменения динамических характеристик материала строится на основе данных, полученных только в точках расположения датчиков, которые также могут приводить к ее искажению. Вторым известным способом является бесконтактный метод исследования – метод лазерной виброметрии. Его достоинством является высокая точность, быстрота измерений и возможность получения полей динамических характеристик материала.

Цель настоящей работы – исследование особенностей динамических характеристик углепластикового композита при помощи метода лазерной виброметрии.

Нагружение образца композиционного материала на основе углепластика проводилось при помощи вибростола TMS 2075E, управляемого с генератора Aktakom AWG-4163. Образец имел размеры 120×100×0,7 мм закреплялся консольно на вибростоле. Образец нагружался ударным импульсом с периодом 5 с со среднеквадратичной скоростью от 2,5 до 255 мм/с. В процессе колебаний проводилось сканирование композита лазерным доплеровским виброметром PSV-500-3D-HV фирмы «Polytec». В каждой точке в процессе затухания колебаний измерялась виброскорость. Частотно-спектральный анализ (FFT) проводился в диапазоне от 8 до 18 Гц.

Динамические характеристики композиционных материалов зависят от многих факторов. В настоящей работе, в частности, исследовалась их зависимость от прикладываемых нагрузок и характера их распределения в образце. С этой целью измерялись динамические характеристики в 5 точках образца, находящихся на одной линии, нормальной к консольному закреплению. Результаты измерений показали, что в рассматриваемых точках значения среднеквадратичной виброскорости увеличиваются с ростом скорости нагружения по линейному закону. Однако с удалением исследуемых точек от места закрепления образца значение виброскорости увеличивается нелинейно. Обнаружено, что значение коэффициента демпфирования уменьшается в 4 раза при малых скоростях нагружения (0–5 мм/с) и далее остается практически постоянным при дальнейшем увеличении нагрузки. При этом с удалением от места закрепления значения коэффициента демпфирования уменьшается для малых скоростей нагружения (до 5 мм/с) и практически не меняется при дальнейшем увеличении нагрузки.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке и испытаний прототипов конструкций из данного композиционного материала.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013–2020 гг., направление III.23.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Круглов А.А.^{1,2}, Еникеев Ф.У.²

¹*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН,
39, ул. Ст. Халтурина, 450001, Уфа, Российская Федерация,
e-mail: alweld@go.ru*

²*Уфимский государственный нефтяной технический университет,
1, ул. Космонавтов, 450062, Уфа, Российская Федерация,
e-mail: kobros@yandex.ru*

Сферические сосуды высокого давления из титановых сплавов находят широкое применение в аэрокосмической технике. К ним предъявляются жесткие требования по обеспечению эксплуатационных характеристик и высокой надежности. Качество сосудов во многом определяется их геометрическими параметрами, структурой и свойствами основного материала и сварных соединений. Поиск путей, направленных на повышение конструкционной прочности сосудов давления, остается актуальной задачей и является целью представленной работы.

По традиционной технологии сосуды давления изготавливают сваркой (электронно-лучевой или аргонодуговой) двух полусфер. В представленной работе для изготовления сосудов давления из титановых сплавов применена технологическая схема «сварка давлением – сверхпластическая формовка». Полуфабрикатом для изготовления сосуда служит круглый пакет, состоящий из двух плоских заготовок, соединенных по периметру сваркой давлением, и снабженный штуцером. При этом каждую заготовку сварного пакета выполняют многослойной, состоящей соответственно из набора нескольких листов. Приведены результаты испытаний на ударный изгиб многослойного материала и результаты испытаний на разрушение внутренним давлением монолитного и многослойного сферических сосудов диаметром 180 мм из титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V).

Показано, что повышение конструкционной прочности сферического сосуда давления может быть достигнуто за счет равнопрочности, многослойности и применения ультрамелкозернистого листового проката.

АТОМНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЗАРОЖДЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВАНАДИИ

Крыжевич Д.С., Корчуганов А.В., Зольников К.П.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
2/4 пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: kryzhev@ispms.ru*

Известно, что размер зерен оказывает влияние на особенности зарождения пластичности в материалах. Так, физико-механические свойства нанокристаллических материалов существенно отличаются от материалов с крупным размером зерен и монокристаллов. В случае нанокристаллических образцов атомные механизмы зарождения и развития пластичности являются предметом активных исследований в настоящее время. При этом наиболее эффективным подходом для изучения поведения материалов на атомном уровне является компьютерное моделирование.

Цель работы – изучение особенностей зарождения пластической деформации в нанокристаллическом ванадии при механическом нагружении. В настоящей работе объектом исследования являлся нанокристаллит ванадия, содержащий зерна примерно одного размера с различными углами разориентации друг относительно друга. Расчеты проведены на основе молекулярно-динамического подхода с использованием многочастичных потенциалов межатомного взаимодействия. В двух направлениях нанокристаллита задавались периодические граничные условия. В третьем направлении прикладывалась сдвиговая нагрузка. Сделан вывод, что зарождение пластичности начинается в межзеренных областях в зонах несовместности деформации. В работе были выявлены характерные локальные структурные перестройки в межзеренных областях, которые приводили к зарождению пластической деформации в нанокристаллите ванадия. Определены пределы упругости и влияние скорости сдвигового нагружения кристаллитов на особенности зарождения в них пластичности. На основании проведенных расчетов выявлены типичные атомные механизмы зарождения пластичности в нанокристаллических образцах ванадия. Проведено сравнение атомных механизмов зарождения пластичности в кристаллитах с межзеренными границами и с идеальной структурой.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

Смирнов С.В., Крючков Д.И., Нестеренко А.В., Березин И.М., Вичужанин Д.И.

ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: kru4koff@bk.ru

Цель представленной работы – проведение экспериментального исследования влияния кратковременной неустановившейся ползучести на деформируемость образцов из алюмоматричного композита. Эта задача обусловлена поиском альтернативных способов термомеханической обработки для изготовления полуфабрикатов и изделий конструкционного назначения из малопластичных материалов с обеспечением требуемого уровня эксплуатационных свойств.

В качестве объекта исследования использован алюмоматричный композит имеющий матрицу из алюминиевого сплава В95 с наполнителем SiC в количестве 10 % по массе.

Образцы подвергались воздействию постоянно действующей сжимающей осевой нагрузке с одновременным нагревом до заданной температуры. Достижение заданной температуры 470 °С происходило за 66 мин, до 570 °С образец нагревался в течение 104 мин. Часть образцов после достижения заданной температуры выдерживалась под нагрузкой определенное время. Для температур 470, 500 и 530 °С выдержка составляла 1 и 3 ч, для температуры 570 °С 1 и 2 ч. Средняя скорость деформирования не превышала 0,00014 1/с. С ростом времени выдержки происходит уменьшение скорости деформации тем интенсивнее, чем выше температура испытания. При выдержке 2–3 ч и температурах 530 и 570 °С средняя скорость деформирования падает до уровня $6 \cdot 10^{-5}$ 1/с. При температурах 470 и 500 °С средняя скорость деформирования не превышает $8 \cdot 10^{-6}$ 1/с.

Наибольший эффект влияния выдержки на степень деформации сдвига наблюдается в интервале температур выше 500 до 570 °С. Эффект наблюдается в условиях снижающегося давления за счет изменения контактной площади образца. При 470, 500 и 570 °С выдержка после достижения заданной температуры незначительно влияет на итоговую степень деформации. Для данного вида испытаний наиболее предпочтительной температурой деформирования является 530 °С. При этой температуре степень деформации сдвига составляет от 0,68 до 1,65, которая достигается при испытании (время от включения печи до извлечения образца) от 1 ч 28 мин до 4 ч 43 мин.

Экспериментально установлено, что деформирование образцов происходит за время нагрева до заданной температуры. Результаты исследований показали, возможность деформирования ММК без разрушения в условиях сжимающих напряжений со степенью деформации достаточной для производства заготовок или готовых изделий.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 14-19-01358.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЛОЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ОТРЫВ

Крючков Д.И., Залазинский А.Г., Агапитова О.Ю.

ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: kru4koff@bk.ru

Цель работы – исследование процессов формоизменения в слоистых металлических композитных материалах (СМКМ) и прогнозирования их расслоения при термомеханических воздействиях с использованием методов компьютерного моделирования.

Для описания процессов формоизменения в слоистых композитах при низкотемпературном воздействии предложена модель образца, которую применили в вычислительных экспериментах. Образец представляет собой осесимметричное тело закрепленное на опоре, сваренное из трех пластин с вырезом под пуансон. Модель предназначена для изучения сопротивления металла распространению имеющейся трещины, которая может возникнуть в процессе эксплуатации. Имитационное моделирование механического испытания проводили методом конечных элементов в пакете Abaqus. Модель материала для верхней пластины соответствует свойствам стали 12Х18Н10Т; для промежуточного слоя алюминиевый сплав АД1; для нижней пластины приняты свойства сплава АМг6.

На первом этапе работы проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния при разной длине l сцепления слоев. Варьировалась длина соединения l , которая составляла 1, 2 и 5 мм соответственно. Напряженно-деформированное состояние оценивалось по границам соединения, при котором начинает развиваться трещина. Моделирование показывает, что при отношении $l/h < 10$ напряженное состояние затрагивает всю границу раздела. При этом инициализация зарождения трещины и ее рост происходят практически одновременно. Поэтому для дальнейших исследований выбрано соотношение длины границы раздела слоев и высоты промежуточного слоя $l/h = 10$. Рассчитана зависимость усилия на пуансоне от отношения длины к высоте промежуточного слоя, а также зависимость интенсивности напряжений в точке отрыва в начальный момент расслоения от отношения длины к высоте промежуточного слоя. Рост отношения l/h оказывает влияние не только на возрастание усилия на пуансоне, но и увеличивает значение величины интенсивности напряжений в точке отрыва в начальный момент расслоения.

Проведена серия вычислительных экспериментов с использованием подхода VCST для моделирования хрупкого разрушения без вязкой составляющей. Основная возникающая пластическая деформация в образце сконцентрирована вблизи контакта пуансона. Возникновение трещины происходит на границе слоев около центра образца и распространяется к его периферии. Основная задача, поставленная в работе, заключалась в выборе таких условий, при которых зарождение трещины сопровождается возникновением напряжений меньше предела текучести и приблизительно равных значению локальной межслойной адгезионной прочности на сдвиг.

Работа выполнена для разработки методики прогнозирования расслоения СМКМ при совместном механическом и температурном воздействиях.

ЖИВУЧЕСТЬ КАБИНЫ ЛОКОМОТИВА ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕПЯТСТВИЯ И УСЛОВИЙ СТОЛКНОВЕНИЯ НА ПЕРЕЕЗДЕ

Емельянов И.Г.^{1,2}, Миронов В.И.¹, Кузнецов А.В.¹

¹*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация,*

²*Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Российская Федерация*

При проектировании несущих элементов кабины локомотива необходимо учитывать возможные сценарии столкновения кабины локомотива с различными препятствиями. В статье предлагается подход определения границы возможных ударных нагрузок для кабины газотурбовоза при столкновении с препятствием, при которых его кабина сохраняет необходимую живучесть. Данная граница определяет область безопасной эксплуатации конструкции кабины при различных параметрах движения локомотива. Если параметры движения локомотива и препятствия будут внутри области, то обеспечивается защита персонала и оборудования кабины.

Конструкция силового каркаса кабины газотурбовоза представляет собой пространственную стержневую систему, собранную из гнутых тонкостенных профилей и балок незамкнутого профиля. По требованиям Европейского стандарта при аварии неповрежденное пространство кабины для выживания поездной бригады должно быть не менее 0,75 м. При выполнении этого условия кабина будет считаться достаточно живучей. Разрушение какого-либо жертвенного элемента буферного устройства кабины газотурбовоза не влечет разрушения всей конструкции. В работе реализован алгоритм расчета предельного состояния кабины с разрушающимися элементами. Алгоритм представлен в виде ряда статических задач, разграниченных условиями разрушения отдельных элементов конструкции. После разрушения «слабого звена» фиксируется значение нагрузки, и элемент исключается из расчетной схемы для решения новой задачи при возрастающей от нуля нагрузке.

Для определения напряженного состояния элементов подвижного состава при ударе использован вычислительный комплекс ANSYS-15. В работе используется упруго-динамическая модель материала.

Для определения предельного состояния конструкции кабины вычисляются напряжения силового пояса и сравниваются с напряжениями Мизеса. Таким образом, увеличивая по шагам внешнюю нагрузку (при этом возможно разрушение элементов вне силового пояса), находится ее предельное значение. Полагается, что разрушение горизонтального силового пояса влечет потерю несущей способности кабины газотурбовоза.

При этом учитывается, что сила взаимодействия кабины локомотива с препятствием определяется элементами многомерного пространства, такими как скорость движения состава, масса препятствия, сила трения препятствия с поверхностью переезда, ориентацией препятствия относительно лобовой балки, площадью лобовой балки, на которую приходится удар. Сила также будет зависеть от жесткости самой кабины с буферным устройством и жесткости конструкции препятствия.

Для многовариантных сценариев столкновения путем расчетов определяется область сопротивления (живучести) кабины в заданных интервалах параметров препятствия и скорости движения. Граница этой области позволит визуально оценивать несущую способность кабины для различных случаев наезда на препятствие. Такая информация будет полезна как при проектировании новых конструкций подвижного состава, так и при эксплуатации локомотива – прохождении «проблемных» переездов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РОСТА ТРЕЩИНЫ В ПЛАСТИНЕ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА

Кузнецов А.В., Друкаренко Н.А., Каманцев И.С., Миронов В.И.

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

В работе рассмотрено решение классической задачи разрушения пластины с отверстием с использованием конечно элементного пакета и оригинальной авторской методики.

Цель работы – экспериментальное подтверждение математического обоснования развития усталостной трещины в конструкционном материале.

Выбор серого чугуна в качестве исследуемого материала обусловлен его широким применением при производстве оборудования, испытывающего постоянные циклические нагрузки. При этом дополнительную сложность при контроле развития дефектов типа трещин в данном материале создают особенности его строения, в частности скачкообразный переход из стадии стабильного роста в стадию долома. Широко используемые методы наблюдения за кинетикой развития трещины не позволяют достоверно оценить вышеописанный момент перехода.

На первом этапе была решена задача по разрушению пластины с отверстием. Численный расчет ресурса пластины проведен в рамках объединительной методики на основе модели циклической деградации свойств материала. Отличительной особенностью решения является варьирование исходных параметров: без поверхностного слоя, с поверхностным слоем, с нелинейным поверхностным слоем, с учетом нелинейности модуля упругости, с учетом нелинейности решения, применяемого в классическом конечно элементном пакете. При этом рассматривались как стадия зарождения, так и стадия развития усталостной трещины.

Полученное решение сопоставлялось с результатами эксперимента. С этой целью были проведены усталостные испытания плоского образца с центральным отверстием. Циклическое нагружение проводилось с использованием высокочастотной испытательной машины MIKROTRON (RUMUL). В ходе нагружения зарождение и рост усталостной трещины фиксировались в режиме реального времени методом лазерной динамической спекл-интерферометрии с использованием оригинального авторского программно-аппаратного комплекса.

По результатам обработки спекловых картин графические интерпретации кинетики развития трещины в сочетании с математическим моделированием позволили максимально точно оценить процессы накопления поврежденности и, как следствие, перераспределения напряжений, происходящих в пластине по мере зарождения трещины. Были определены моменты зарождения и кинетические особенности критического роста трещины, а также распределение напряжений при ее ускоренном росте.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00339_мол_а.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ МЕДЛЕННОМ ДВИЖЕНИИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

Кузоватова О.И.

Сибирский федеральный университет,
79, пр. Свободный, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация,
e-mail: oik17@yandex.ru

Одной из фундаментальных задач геомеханики является задача о движении геоматериалов в сходящихся каналах.

Цель настоящей работы – построить аналитическое решение задачи о движении сыпучей среды в сходящемся канале на основе оригинальной модели, учитывающей разную прочность материала.

1. Математическая модель

Для описания напряженно-деформированного состояния сыпучей среды как разнопрочного материала, имеющего различные пределы прочности при растяжении и сжатии, будем использовать модель среды с пластическими связями. Под действием сжимающих или растягивающих напряжений, меньших коэффициента сцепления (предела прочности связей), такая среда не деформируется. По мере достижения предела прочности деформация развивается в соответствии с теорией линейного упрочнения. Реологическая схема модели представлена на рис. 1.

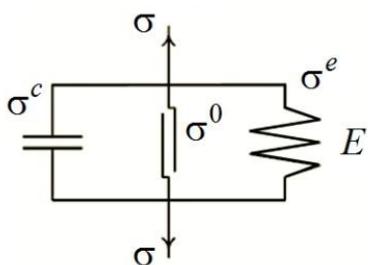


Рис. 1. Реологическая схема

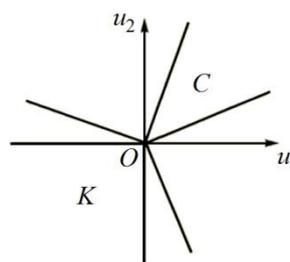


Рис. 2. Конусы деформаций C и напряжений K

Судя по этой схеме, справедливо аддитивное представление $\sigma = \sigma^c + \sigma^0 + \sigma^e$. Здесь σ – тензор полных напряжений; σ^c – тензор напряжений в контакте; σ^0 – тензор сцепления; $\sigma^e = E : \varepsilon$ – тензор упругих напряжений; ε – тензор деформаций; E – симметричный положительно определенный тензор модулей упругости. Тензор σ^c подчиняется вариационному неравенству:

$$\sigma^c : (\varepsilon - \varepsilon^0) \leq 0; \quad \varepsilon, \varepsilon^0 \in C, \quad (1)$$

в котором C – конус допустимых деформаций (рис. 2), имеющий вид $C = \{\varepsilon \mid \kappa \gamma(\varepsilon) \leq \theta(\varepsilon)\}$; κ – параметр дилатансии; $\gamma(\varepsilon) = \sqrt{2\varepsilon' : \varepsilon'}$ – интенсивность сдвига; $\varepsilon' = \varepsilon - \theta \delta / 3$ – девиатор деформаций; $\theta(\varepsilon) = \varepsilon : \delta$ – деформация объема; δ – символ Кронекера.

С учетом введенных обозначений неравенство (1) принимает вид:

$$(E : \varepsilon - \sigma + \sigma^0) : (\varepsilon - \varepsilon^0) \geq 0; \quad \varepsilon, \varepsilon^0 \in C.$$

По определению проекции это означает, что

$$\varepsilon = \pi_C \left[E^{-1} (\sigma - \sigma^0) \right],$$

где π – оператор проекции на конус C по норме $|\varepsilon| = \sqrt{\varepsilon : E : \varepsilon}$.

Рассмотрим элемент конструкции из разнопрочного материала, занимающий плоскую область Ω с границей $\partial\Omega = \Gamma$, состоящей из двух непересекающихся частей Γ_u и Γ_σ , на первой из которых отсутствуют перемещения, а на второй – задан вектор распределенной нагрузки p . Справедливы уравнения равновесия в вариационной форме и граничные условия:

$$\int_{\Omega} (\nabla \cdot \sigma + f)(\vartheta - u) d\Omega = 0; \quad (2)$$

$$u = \vartheta = 0 \text{ на } \Gamma_u; \quad \sigma \cdot n = p \text{ на } \Gamma_\sigma. \quad (3)$$

Задача (2)–(3) сводится к задаче о минимуме $\min_{\vartheta \in U_C} J(\vartheta) = J(u)$, где

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} \varepsilon : E : \varepsilon + \varepsilon : \sigma^0 - f \cdot u \right) d\Omega - \int_{\Gamma_\sigma} p \cdot u d\Gamma;$$

$$U_C = \left\{ u \in H^1(\Omega) \mid u|_{\Gamma_u} = 0, \quad \varepsilon(u) \in C \right\}.$$

Так как C – конус с вершиной в нуле, то непосредственными вычислениями определяется:

$$J(u) = - \max_{\substack{\vartheta \in U_C \\ \vartheta \neq 0}} \frac{\left[\int_{\Omega} (\varepsilon(\vartheta) : \sigma^0 - f \cdot \vartheta) d\Omega - \int_{\Gamma_\sigma} p \cdot \vartheta d\Gamma \right]_+^2}{2 \int_{\Omega} \varepsilon(\vartheta) : E : \varepsilon(\vartheta) d\Omega}, \text{ где } z_+ = \begin{cases} z, & z \geq 0, \\ 0, & z < 0. \end{cases}$$

Поле перемещений тождественно равно нулю, в том и только том случае, если

$$\int_{\Omega} (\varepsilon(\vartheta) : \sigma^0 - f \cdot \vartheta) d\Omega - \int_{\Gamma_\sigma} p \cdot \vartheta d\Gamma \leq 0, \quad \forall \vartheta \in U_C. \quad (4)$$

Нагрузка (f, p) называется безопасной, если $u \equiv 0$. Пусть $p = 0$, $f = m \cdot f^0$, где m – параметр нагружения. Тогда из (4) получим, что нагрузка будет безопасной при изменении параметра m от нуля до предельного значения (коэффициента запаса)

$$m^* = \min_{\substack{\vartheta \in U_c \\ \vartheta \neq 0}} \frac{\int_{\Omega} \varepsilon(\vartheta) : \sigma^0 d\Omega}{\left[\int_{\Omega} f \cdot \vartheta d\Omega \right]_+}. \quad (5)$$

Доказанное утверждение представляет собой формулировку кинематической теоремы о предельном равновесии, известной из теории пластичности.

2. Аналитическое решение

В качестве примера рассмотрим задачу о плоском течении под действием собственного веса сыпучей среды в сходящемся канале. Предположим, что $\alpha > \beta$, и рассмотрим два случая, представленных на рис. 3 и 4.

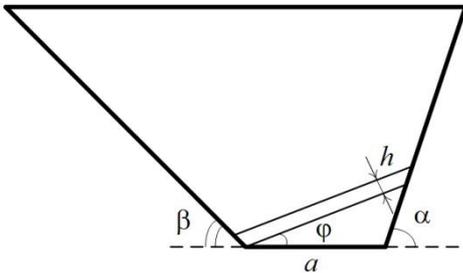


Рис. 3. Случай 1

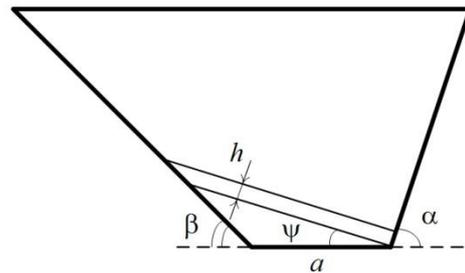


Рис. 4. Случай 2

Рассчитаем коэффициенты запаса m_1 и m_2 , выберем наименьшее значение, которое и будет коэффициентом запаса m^* в данной задаче.

Для случая 1 допустимое поле перемещений $\vartheta = (\vartheta_1, \vartheta_2)$ описывает локализацию деформации простого сдвига с дилатансией в узкой линейной зоне толщины h , наклоненной под углом φ . В декартовой системе координат, связанной с этой зоной

$$\begin{cases} \vartheta_1 = -u_0 \cos(\alpha - \varphi), \\ \vartheta_2 = -u_0 \sin(\alpha - \varphi). \end{cases} \quad \begin{cases} \gamma_0 = \frac{u_0}{h} \cos(\alpha - \varphi), \\ \varepsilon_0 = \frac{u_0}{h} \sin(\alpha - \varphi). \end{cases}$$

Проведем расчеты интегралов, входящих в (5):

$$\int_{\Omega} \varepsilon(\vartheta) : \sigma^0 d\Omega = \varepsilon_0 \sigma^0 S.$$

Здесь $\sigma^0 = \tau_s / \kappa$; τ_s – предел текучести; $S = hl$; $l = a(\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi))$.

«Выпадающая» треугольная область движется как твердое целое, следовательно,

$$\int_{\Omega} f \cdot \vartheta d\Omega = f^0 \cdot S_{\Delta}.$$

Здесь $f^0 = \rho g u_0 \sin \alpha$, $S_{\Delta} = \frac{1}{2} Hl$, $H = a \sin \varphi$. Поэтому коэффициент запаса m_1 равен

$$m_1 = \frac{2\tau_s}{\kappa\rho g a} \min_{\substack{\theta \in U_c \\ \theta \neq 0}} \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sin \alpha \sin \varphi}. \quad (6)$$

Условие $\theta \in U_c$ принимает следующий вид: $\gamma_0 \leq v\varepsilon_0$, где $v = \sqrt{1/\kappa^2 - 4/3}$. Тогда

$$\frac{\varepsilon_0}{\gamma_0} = \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) \geq \frac{1}{v} \quad \text{или} \quad \sin(\alpha - \varphi) \geq \frac{1}{\sqrt{v^2 + 1}}.$$

Выражение (6) достигает своего минимума при равенстве в последних выражениях. Вычислив $\sin \varphi = \frac{v \sin \alpha - \cos \alpha}{\sqrt{v^2 + 1}}$, получим формулы для коэффициента запаса (для двух случаев):

$$m_1 = \frac{2\tau_s}{\kappa\rho g a} \frac{1}{\sin \alpha} \frac{1}{(v \sin \alpha - \cos \alpha)}; \quad m_2 = \frac{2\tau_s}{\kappa\rho g a} \frac{1}{\sin \beta} \frac{1}{(v \sin \beta - \cos \beta)}.$$

Анализ показал, что неравенство $m_1 < m_2$ справедливо при $\beta < \alpha$. Таким образом, основным результатом работы является утверждение о том, что зона локализации направлена под углом (рис. 3):

$$\varphi = \alpha - \arcsin \frac{1}{\sqrt{v^2 + 1}}.$$

Выводы

Для исследования локализации деформаций при движении сыпучей среды под действием собственного веса в сходящемся канале используются вариационные принципы теории предельного равновесия, установленные в рамках специальной математической модели материала, по-разному сопротивляющегося растяжению и сжатию. Получена оценка для коэффициента запаса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-31-00019).

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Курашкин К.В., Гончар А.В.

*Институт проблем машиностроения РАН –
филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН»,
85, Белинского, Нижний Новгород, 603024, Российская Федерация,
e-mail: kurashkinky@yandex.ru*

Обеспечение безопасности и предупреждение чрезвычайных ситуаций техногенного характера при эксплуатации объектов ответственного назначения в жестких климатических условиях Крайнего Севера и Арктики требует создания новых и адаптации существующих методик неразрушающего контроля фактического состояния материала при пониженных температурах.

Цель работы – выявление корреляционных связей между изменениями акустических характеристик и исчерпанием ресурса пластичности для разработки методики ультразвуковой оценки поврежденности металлических сплавов на ранней стадии разрушения при пониженных температурах.

Для проведения исследования были выбраны низкоуглеродистая сталь 07ГБЮ, нержавеющая аустенитная сталь 12Х18Н10Т и деформируемый алюминиевый сплав АМгб, широко используемые для создания машин и конструкций арктического назначения.

В результате испытаний образцов на одноосное растяжение при температурах +20 °С и –60 °С и ультразвуковых измерений были получены зависимости скоростей распространения упругих волн и параметра акустической анизотропии от величины пластической деформации. Проведенное исследование показывает, что при статическом пластическом деформировании в поликристаллических металлических сплавах развивается структурная неоднородность, которая отражается на развитии неоднородности распределения акустических характеристик. В общем случае изменение скорости распространения упругих волн при пластическом деформировании немонотонно и связано с одновременным накоплением микроповреждений, формированием текстуры деформации и выделением новых фаз. Для исследованных сплавов установлено, что параметр акустической анизотропии монотонно изменяется при пластическом деформировании, что дает возможность использовать его для оценки поврежденности.

В результате анализа экспериментальных данных получены корреляционные соотношения, которые позволяют оценить исчерпание ресурса пластичности по изменению параметра акустической анизотропии. Полученные соотношения можно использовать в дальнейшем для разработки методики оценки поврежденности металлических сплавов в процессе эксплуатации при пониженных температурах, что позволит уменьшить риски возникновения аварийных ситуаций на технических объектах арктического назначения.

С практической точки зрения важным преимуществом использования параметра акустической анизотропии является то, что результаты измерений не зависят от температуры, измерения могут быть выполнены при одностороннем доступе к объекту контроля, для измерений могут быть использованы как контактные пьезоэлектрические, так и бесконтактные ЭМА преобразователи.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-6069.2018.8 «Разработка способа оценки поврежденности при разрушении конструкционных сталей и металлических сплавов в жестких климатических условиях Крайнего Севера и Арктики».

МНОГОУРОВНЕВОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ТИТАНЕ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

Курмоярцева К.А.¹, Трусов П.В.²

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, пр. Комсомольский, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: kurmoiartseva.k@mail.ru, tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Увеличение срока службы деталей и конструкций является одним из важнейших вопросов механики и материаловедения на протяжении многих десятилетий. Это наиболее актуально для авиационной промышленности, в которой выдвигаются строгие требования к механическим свойствам поликристаллических материалов, например титановых сплавов [1]. Рабочие характеристики, срок службы деталей определяется прежде всего микроструктурой, формируемой в процессе изготовления и эволюционирующей при их эксплуатации. При этом важно уметь описывать и прогнозировать накопление повреждений и эволюцию физико-механических свойств материала при деформировании. Для корректного описания физических процессов требуется исследовать поведение материала и соответствующие механизмы на микро- и мезомасштабах.

Деформирования и накопления поврежденности являются многостадийными и многоуровневыми процессами эволюции и накопления дефектов различной природы. При этом на каждом масштабном уровне реализуются различные физические механизмы. Например, накопление поврежденности обусловлено взаимодействием дислокаций и точечных дефектов, приводящим к образованию микроскопических трещин, увеличению их количества и размеров, ветвлению трещин и прорастанию трещины, разделяющей тело на части. Одним из наиболее перспективных направлений для описания таких процессов представляется построение многоуровневых моделей, основанных на физических теориях пластичности и обеспечивающим возможность явным образом отслеживать меняющуюся микроструктуру материала.

Цель проводимого авторами исследования – разработка многоуровневой математической модели для анализа поведения поликристаллических материалов, позволяющей описывать процессы накопления поврежденности. При этом разработка модели, основанной на физической теории упруговязкопластичности, включающей механизмы деформирования и разрушения, характерные для широкого диапазона изменения параметров термомеханических воздействий, позволяет избежать априорного «навязывания» определенной моды разрушения на макроуровне. Предполагается, что определяющую роль в процессе разрушения играет неупругая деформация и образование микротрещин происходит за счет взаимодействия дислокаций, дислокационных барьеров, границ и включений. Таким механизмом является зарождение в титановых сплавах фасеточных трещин. В качестве основы этого механизма образования трещин используется широко известная дислокационная модель Стро [2].

В структуре разрабатываемой модели выделены макроуровень, мезоуровень – I и мезоуровень – II. Представительным объемом на макроуровне является совокупность большого количества кристаллитов (зерен, субзерен), каждый из которых рассматривается как представительный объем мезоуровня – I. Части зерен и субзерен рассматриваются на мезоуровне – II. Конститутивные соотношения разрабатываемой модели сформулированы в скоростной форме. Параметрами макроуровня являются осредненные характеристики мезоуровня – I, удовлетворяющие уравнениям равновесия. Мезоуровень – I используется для описания процессов пластического деформирования и упрочнения в терминах сдвигов по системам скольжения кристаллита. На мезоуровне – II описание процессов пластического деформирования и накопления поврежденности осуществляется в терминах плотностей дислокаций. Соотношение для определения скорости сдвига формулируется по аналогии с уравнением Орована (с учетом дислокаций разных знаков в каждой системе скольжения). Кроме того, записываются эволюционные уравнения для

плотностей и скоростей движения дислокаций, скоростей сдвига, действующих и критических сдвиговых напряжений для каждой системы скольжения с учетом плотностей мобильных и иммобильных дислокаций, источников дислокаций, а также процессов аннигиляции, мобилизации и иммобилизации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01292).

Литература

1. Banerjee D., Williams J. C. Perspectives on Titanium Science and Technology // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61. – P. 844–879.
2. Ozturk D., Pilchak A. L., Ghosh S. Experimentally validated dwell and cyclic fatigue crack nucleation model for β -titanium alloys // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 127. – P. 15–18.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Ли Ю.В., Баранникова С.А., Зуев Л.Б.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: bsa@ispms.ru, lbz@ispms.ru, jul2207@mail.ru*

На протяжении последних десятилетий изучение процесса локализации пластической деформации на макромасштабном уровне является одной из наиболее сложных проблем, связанных с пластическим течением материалов. Экспериментальные исследования локализации пластической деформации, выполненные методом двухэкспозиционной спекл-интерферометрии, методом корреляции цифровых спекл изображений (DIC) [1] показали, что для различных видов материалов с ГЦК-, ОЦК- и ГПУ-кристаллическими решетками пластическая деформация протекает локализовано на всем протяжении процесса деформирования.

Деформационному поведению многослойных материалов при интенсивной пластической деформации посвящено ограниченное количество работ. Такие материалы могут быть изготовлены с помощью соединения разнородных металлов в монолитную композицию, сохраняющую надежную связь составляющих при дальнейшей технологической обработке и в условиях эксплуатации [2].

В работе исследовались образцы биметалла, вырезанные из полосы, полученной по следующей схеме: между вставленными в изложницу листами плакирующего металла – 12Х18Н10Т в качестве основного металла заливалась Ст3 ($t = 1500$ °С) с последующей горячей прокаткой полученного трехслойного листа при $t = 1200\div 1400$ °С. По внешнему краю образца с обеих сторон расположен плакирующий слой из стали 12Х18Н10Т толщиной ≈ 750 мкм, в центре – основной металл $\approx 6,7$ мм Ст3.

Механические испытания на одноосное растяжение проводились при $T = 300$ К со скоростью деформации $6,67 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ на испытательной машине LFM-125.

В ходе проведения экспериментов были получены кривые нагружения биметалла и металлов, являющихся его составляющими: Ст3 и сталь марки 12Х18Н10Т. На кривых нагружения Ст3 и биметалла видны выраженные зуб и площадка текучести, на которой заметны колебания деформирующего напряжения. Наличие плакирующего слоя нержавеющей стали приводит к сокращению продолжительности площадки текучести, увеличению предела прочности и уменьшению пластичности основного металла Ст3. Для полного охвата процессов зарождения и развития локализованных зон пластической деформации в биметалле в ходе экспериментов проводилась параллельная регистрация спекл-изображений с использованием универсального измерительного комплекса ALMEC-tv для цифровой регистрации полей векторов смещений и компонент тензора пластической дисторсии.

Анализ картин локализации пластической деформации показал, что локализация пластической деформации начинается с образования Полосы Чернова–Людерса (ПЧЛ) в основном слое материала Ст3, она ограничена парой фронтов, движущихся в противоположных направлениях вдоль оси биметалла с разными скоростями. Плакирующий слой нержавеющей стали толщиной 750 мкм приводит к сокращению площадки текучести биметалла, не подавляет образование ПЧЛ, приводит к увеличению скорости распространения фронтов ПЧЛ в основном слое и уменьшает распространение ПЧЛ во всех слоях биметалла.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2015–2020 гг. и гранта РФФИ №16-08-00385-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zuev L. B., Gorbatenko V. V., Pavlichev K. V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses // Measurement Sci. Tech. – 2010. – Vol. 21, no. 5. – P. 054014-1–054014-5. – DOI: 10.1088/0957-0233/21/5/054014.
2. Голованенко С. А., Меандров Л. В. Производство биметаллов. – М. : Metallurgia, 1966. – 304 с.

РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННОМ ПОЛОМ ЦИЛИНДРЕ ИЗ СТОХАСТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Радченко В.П., Либерман А.Е., Рузов А.В.

*Самарский государственный технический университет,
244, ул. Молодогвардейская, г. Самара, 443100, Российская Федерация,
e-mail: radch@samgtu.ru, aliberman740@gmail.com, taylor27297@gmail.com*

Исследовано влияние неоднородности деформации ползучести по пространственно-временной координате на процесс релаксации остаточных напряжений поверхностно упрочненного цилиндрического образца из сплава Д16Т при $T = 125$ °С в условиях одноосного растяжения. На первом этапе выполнены экспериментальные исследования для определения разброса деформации ползучести по длине рабочей части образца (внешний и внутренний радиусы цилиндра 5 и 15 мм соответственно, длина рабочей части 65 мм). Для этого вдоль образующей наносили керном метки, используя которые измеряли длины локальных участков перед испытаниями и в процессе ползучести в фиксированные моменты времени, затем рассчитывались деформации ползучести локальных участков. Всего было испытано 4 образца при осевых растягивающих напряжениях 353; 386; 406,2; 420 МПа. Первые 3 образца разбивали на 9 локальных участков примерно одинаковой длины, а четвертый – на 7 участков. Измерение удлинений локальных участков осуществлялось на инструментальном микроскопе УИМ-23 с точностью ± 1 мкм после ползучести и температурно-силовой разгрузки в определенные моменты времени. Приведены как среднеинтегральные (по всей длине образца), так и локальные экспериментальные значения деформации ползучести. Установлен значительный разброс локальной деформации ползучести по отношению к макросредней, достигающий 150–200 % в пределах одного образца. Отметим, что определение разброса деформации ползучести производилось уже на упрочненных образцах, которые затем использовались для определения остаточных напряжений после ползучести.

При использовании экспериментальных данных на локальных участках построена феноменологическая стохастическая модель ползучести с двумя случайными параметрами, описывающая любую реализацию локальной деформации ползучести. Разработана методика идентификации значений случайных величин применительно к конкретной реализации.

Вторая часть работы связана с реализацией методики расчета релаксации остаточных напряжений в полом цилиндра в процессе ползучести, изложенной в [1], применительно к каждому локальному участку с учетом его индивидуального характера реологического деформирования. Предполагалось, что в пределах каждого локального участка деформация ползучести описывается значениями двух случайных величин, которые не изменяются в пределах этого участка. Каждой паре значений случайных величин будет соответствовать поле остаточных напряжений.

Детально проанализирована кинетика полей остаточных напряжений для всех четырех образцов из сплава Д16Т при $T = 125$ °С и показано, что в пределах одного образца скорость релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести может отличаться на различных локальных участках более чем в 2 раза. При этом в процессе ползучести за 100 ч, например, значение осевой компоненты остаточных напряжений уменьшилось (по модулю) в 4 раза и более по отношению к начальному состоянию после процедуры упрочнения. Этот факт, во-первых, играет важную роль при оценке ресурса упрочненных деталей в условиях ползучести, оценить который без статистических подходов невозможно. Во вторых, полученные результаты могут внести некоторые коррективы в хорошо известный и апробированный экспериментальный метод колец и полосок [2] для определения остаточных напряжений и степени их релаксации для цилиндрических изделий в условиях неоднородности распределения деформации ползучести в пределах даже одного образца, поскольку результаты будут существенно зависеть от места вырезки кольца в соответствующей втулке.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ (проект № 16-01-00249_а).

Литература

1. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в упрочненном цилиндрическом образце в условиях ползучести / В. П. Радченко, Е. П. Кочеров, М. Н. Саушкин, В. А. Смыслов // ПМТФ. – 2015. – Т. 56, № 2. – С. 169–177.
2. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения : сборник научных трудов. – Куйбышев : Куйбышев. авиац. ин-т, 1974. – Вып. 53. – С. 32–42.

ВЛИЯНИЕ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ОТЖИГОВ НА ОБРАТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ МАРТЕНСИТ–АУСТЕНИТ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЮ В МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

Литовченко И.Ю.^{1,2}, Тюменцев А.Н.^{1,2}, Аккузин С.А.²

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Российская Федерация, e-mail: litovchenko@spti.tsu.ru

²Национальный Исследовательский Томский государственный университет,
пр. Ленина 36, Томск, 634050, Россия

Одним из способов формирования субмикро- и нанокристаллических структурных состояний в аустенитных сталях является использование прямого мартенситного превращения в условиях деформации и (или) термомеханических обработок и последующего обратного превращения мартенсита в аустенит в процессе отжига. В таких условиях возможно получение структуры с субмикроструктурными зернами аустенита, обладающей повышенными значениями прочности и хорошими значениями пластичности. Температура и продолжительность отжига оказывают определяющее влияние на фазовый переход аустенит–мартенсит и рекристаллизацию деформированной структуры.

Цель настоящей работы – исследование влияния кратковременных высокотемпературных отжигов на особенности структурно-фазовых состояний и механические свойства метастабильной аустенитной стали Fe-18Cr-10Ni-Ti после термомеханических обработок. Обработки включали низкотемпературную (при $T = -196$ °С) и последующую деформацию при $T = 20–400$ °С. После таких обработок сталь находилась в двухфазных (аустенит + мартенсит) структурных состояниях.

Для увеличения объемной доли аустенита и повышения пластичности при сохранении субмикроструктурной структуры и повышенных значений прочности проводили кратковременные высокотемпературные отжики при $T = 850$ °С длительностью 30–120 с, 1–8 цикла. Особенности структурно-фазовых состояний исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного фазового анализа. Механические свойства изучали в процессе растяжения при комнатной температуре.

Показано, что термомеханические обработки способствуют интенсивному ($\gamma \rightarrow \alpha'$)-мартенситному превращению с формированием до ≈ 80 % α' -мартенсита. Полученная структура обеспечивает существенное повышение предела текучести до $\approx 1160–1260$ МПа при относительном удлинении $\approx 2,3–3,2$ %.

Отжики длительностью 30 с, 1–4 цикла после термомеханических обработок способствуют формированию ферритно-мартенситной структуры с объемным содержанием мартенсита до ≈ 95 %. При этом сохраняется высокое значение предела текучести ≈ 1170 МПа при относительном удлинении 4,1 %.

Последующие отжики длительностью 70 с приводят к обратному ($\alpha' \rightarrow \gamma$)-мартенситному превращению. В микроструктуре стали начинаются процессы возврата и рекристаллизации, что приводит к некоторому снижению предела текучести до значений ≈ 1073 МПа, при этом относительное удлинение составляет 5,2 %. Объемная доля аустенита увеличивается после каждого цикла, и при 4 циклах составляет ≈ 70 %. Увеличение количества циклов отжига до 8 приводит к практически полному обратному превращению мартенсита в аустенит (≈ 91 %). Размеры рекристаллизованных зерен составляют $\approx 200–300$ нм. Такое структурное состояние обеспечивает значения предела текучести до ≈ 853 МПа.

Отжики длительностью 120 с, 1–4 цикла приводят к значительному повышению объемного содержания аустенита. Предел текучести стали при этом снижается до $\approx 630–712$ МПа, относительное удлинение возрастает до 11,2–18,3 %.

Таким образом, кратковременные 30–120 с, высокотемпературные отжики метастабильной аустенитной стали после термомеханических обработок в зависимости от времени выдержки позволяют получить двухфазные структурные состояния с различными значениями прочности и пластичности.

ДЕГРАДАЦИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ С ЗАПОЛНИТЕМ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НА РАСТЯЖЕНИЕ, СЖАТИЕ И СДВИГ

Лобанов Д.С.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, Российская Федерация,
e-mail: cem.lobanov@gmail.com*

При внедрении композиционных материалов особое значение приобретают вопросы анализа условий разрушения и живучести изделий. Актуальными задачами становятся решения проблем, связанных с развитием методов экспериментального исследования деформационных и прочностных свойств конструкционных композитов, определением безопасного деформационного ресурса изделий при комплексном воздействии механических нагрузок и эксплуатационных температур, учетом деградации свойств под влиянием внешних эксплуатационных загрязняющих сред, оценкой опасности технологических и эксплуатационных дефектов, возникающих в элементах конструкций, и возможностью их локального ремонта [1–3]. Актуальной задачей является получение новых фундаментальных результатов в области механики деформирования и разрушения композиционных материалов при реализации температурно-силовых нагружений, максимально приближенных к реальным режимам эксплуатации, на базе экспериментальных исследований с использованием современного испытательного оборудования и измерительных систем.

Цель работы – экспериментальные исследования механических свойств полунатурных образцов крупноячеистых композиционных материалов на основе стекло- и углепластиков с коробчатым (трубчатым) наполнителем с продольным и поперечным расположением, при квазистатическом растяжении, сжатии и сдвиге в условия нормальных и повышенных (100 °С; 150 °С) температур.

Квазистатические испытания на растяжение, сжатие и сдвиг проводились по методикам, предложенным в [4, 5]. По результатам испытаний проведен анализ потери несущей способности полунатурных образцов при испытаниях в условиях повышенных температур.

Таким образом, экспериментально установлено, что при растяжении снижение несущей способности при повышенной (100 °С) температуре испытаний относительно несущей способности при нормальной температуре для образцов-панелей из стеклопластика в среднем 28–34,7 %, из углепластика 0–9,5 %.

При испытаниях на сжатие необходимо отметить что при повышенной температуре происходит существенное снижение несущей способности образцов-панелей. Снижение для образцов из стеклопластика составляет 62–67 %, из углепластика снижение составляет 72–73%. При испытаниях на сдвиг при температуре 100 °С, происходит потеря несущей способности образцов-панелей из стеклопластика на 21 % и углепластика на 23 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00763 в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

1. Evaluation of repair efficiency in structures made of fibrous polymer composite materials / A. N. Anoshkin, V. E. Vildeman, D. S. Lobanov, A. I. Chikhachev // *Mechanics of Composite Materials*. – 2014. – Vol. 50, no. 3. – P. 311–316.
2. Experimental research into the effect of external actions and polluting environments on the serviceability of fiber-reinforced polymer composite materials / D. S. Lobanov, V. E. Vildeman,

A. D. Babin, M. A. Grinev // *Mechanics of Composite Materials*. – 2015. – Vol. 51, no. 1. – P. 69–79.

3. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии / Д. С. Лобанов, В. Э. Вильдеман, Е. М. Спаскова, А. И. Чихачев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2015. – № 4. – С. 159–170.

4. Вильдеман В. Э., Третьякова Т. В., Лобанов Д. С. Учет жесткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композиционного материала // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2012. – № 2. – С. 34–49.

5. Зуйко В. Ю., Лобанов Д. С., Аношкин А. Н. Методики определения предела прочности полунатурных образцов-панелей из композиционных материалов при статических испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2012. – № 2. – С. 99–111.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ СДВИГОВОГО ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В БЕСШОВНЫХ ТРУБАХ

Лобанов М.Л.¹, Пышминцев И.Ю.², Мальцева А.Н.², Усков Д.П.³,
Данилов С.В.¹, Пастухов В.И.^{1,4}, Макарова Е.А.¹

¹УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,

²ОАО «РосНИТИ», д. 30, ул. Новороссийская, г. Челябинск, 454139, Российская Федерация,

³ОАО «Волжский трубный завод», д. 6, ул. Автодорога 7, г. Волжский, 404119, Российская Федерация,

⁴АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, а/я 29, 624250, Российская Федерация,
e-mail: m.l.lobanov@urfu.ru

Производство конструкционных и функциональных металлических материалов, и изделий, как правило, реализуемое в виде направленных деформационных и термических воздействий, приводит к формированию в них кристаллографической текстуры. Наличие текстуры придает изделиям определенный уровень ориентационно-зависимых физико-механических свойств, а учет ее возникновения и развития позволяет оптимизировать известные и разрабатывать новые технологии [1, 2].

Цель работы – установление наиболее общих закономерностей формирования кристаллографической текстуры в бесшовных стальных трубах на всех стадиях их производства.

Методом сканирующей электронной микроскопии с использованием ориентационного анализа [2], основанного на дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), исследованы микроструктуры и кристаллографические текстуры, сформировавшиеся в изделиях из сталей 08ХМФЧ, 25ГМФ, 10Х13Н3МФБ на технологических стадиях изготовления бесшовных труб: горячая деформация в аустенитной области; закалка и последующий высокий отпуск.

Установлено, что все структуры (феррит, бейнит, мартенсит) в изделиях как после горячей деформации, так и после закалки характеризуются наличием текстуры, преимущественно состоящей из рассеянных, но выраженных двух симметричных компонент из совокупности $\{112\}\langle 110\rangle$. Более точно сформированную в результате γ - α -превращения текстуру следует определить как аксиальную, ось которой $\langle 111\rangle$ является параллельной касательной к диаметру трубы.

Показано, что процесс формирования данной текстуры, также как и наблюдаемая в процессе термической обработки текстурная наследственность, определяются следующими правилами отбора определенных ориентаций α -фазы при γ - α -превращении: 1) наличием стабильных деформационных ориентировок аустенитных зерен; 2) специальными разориентациями границ ($\Sigma 3$, $\Sigma 11$) между зернами γ -фазы, на которых начинается превращение; 3) ориентационными соотношениями, реализующимися при превращении [3]; 4) термическими напряжениями (в основном радиальными), возникающими в трубе при ее охлаждении. Последние являются ответственными за формирование специфической кристаллографической текстуры γ - α -превращения в бесшовных стальных трубах.

Литература

1. Fiber vs Rolling Texture: Stress State Dependence for Cold-Drawn Wire / M. A. Zorina, M. S. Karabanalov, S. I. Stepanov et al. // Metallurgical and Materials Transaction A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 2017. – P. 1–7. Volume 49, pp. 427–433; doi:10.1007/s11661-017-4423-0
2. Методы исследования текстур в материалах / М. Л. Лобанов, А. С. Юровских, Н. И. Кардолина, Г. М. Русаков. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. – 2014. – 115 с.
3. Исследование специальных разориентаций в речном мартенсите низкоуглеродистой стали методом ориентационной микроскопии / М. Л. Лобанов, Г. М. Русаков, А. А. Редикольцев и др. // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117, № 3. – С. 266.

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ПОГЛОЩЕННОЙ МАТЕРИАЛОМ В ПРОЦЕССЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лукин Е.С.

ФГБУН ИФТПС им. В.П. Ларионова СО РАН, ул. Октябрьская, д.1, Якутск, 677980, Российская Федерация,
e-mail: lukin@iptpn.ysn.ru

В настоящей работе рассматриваются вопросы определения работы затраченной на деформирование материала и оценки поглощенной и рассеявшейся энергии в процессе упруго-пластического деформирования конструкционных сталей. Оценка поглощенной энергии производится на основе разработанной расчетно-экспериментальной методики с привлечением средств тепловизионной диагностики. Как известно, пластическая деформация конструкционных сталей сопровождается выделением теплоты. Явление термопластического эффекта в основном связывают с эволюцией дислокационной структуры. Зарождение и движение дислокаций по рельефу Пайерлса, приводит к возникновению дополнительного колебательного движения атомов кристаллической структуры, в результате которого наблюдается повышение температуры деформируемого металла [1].

Цель работы – оценка энергии, поглощенной материалом в процессе упруго-пластического деформирования конструкционных сталей.

В соответствии с первым началом термодинамики работа пластической деформации dA_p частично поглощается материалом, в то время как другая часть – выделяется в виде теплоты dQ . Таким образом, поглощенная энергия dE_S определяется как разность между работой пластической деформации и количеством теплоты, рассеявшимся в окружающую среду [2]:

$$dE_S = dA_p - dQ. \quad (1)$$

Работа пластической деформации определяется из диаграммы деформирования [3]. Образец рассматривается как стержень. Количество теплоты оценивается из решения одномерного стационарного уравнения теплопроводности (2) с постоянными коэффициентами на основе данных тепловизионных измерений температуры деформируемого образца [4]:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \nu(T(x, \tau) - T_c) + \frac{q_v}{c\rho} \quad (2)$$

с краевыми условиями: $T(x, 0) = T_c$, $T(0, \tau) = T_c$, $T(l, \tau) = T_c$.

Для нахождения мощности внутреннего источника теплоты решается обратная задача теплопроводности с постоянными коэффициентами. В работе приводится оценка теплоты, рассеявшейся в процессе статического растяжения плоских гладких образцов, изготовленных из конструкционных сталей.

Выводы

Показано, что количество рассеявшейся теплоты зависит от пластичности конструкционной, стали. Снижение характеристик пластичности материала приводит к снижению диссипации энергии в виде теплоты.

Разработанная расчетно-экспериментальная методика позволяет оценить количество энергии поглощенной материалом при пластическом деформировании сталей.

Работа выполнена в рамках научного проекта № III.28.1.1 по программе III.28.1 Сибирского отделения Российской академии наук.

Литература

1. Григорьев А. К., Колбасников Н. Г., Фомин С. Г. Структурообразование при пластической деформации металлов. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 1992. – 244 с.
2. Taylor G. I., Quinney H. The latent energy remaining in a metal after cold working // Proceedings of the Royal Society A, London. – 1934. – Vol. 143. – P. 307–326.
3. Pieczyska E. A., Gadaj S. P., Nowacki W. K. Rate of energy storage during consecutive deformation of steel // QIRT'2000 : proceedings of Eurotherm Seminar. – Reims, France, 2000. – No. 64. – P. 260–264.
4. Ivanov A. M., Lukin E. S., Vainer B. G. Evaluation of storage energy of the constructional steel during plastic deformation. // QIRT'2006. – Padova, Italy, 2006. – P. 10–11.

ПОИСК КРИТЕРИЕВ УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН РЭЛЕЯ

Лунев А.Г., Надежкин М.В., Бочкарева А.В., Стаскевич О.С.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, просп. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: agl@ispms.ru*

В настоящее время достаточно полно изучены возможные методы физической акустики, используемые при изучении металлических материалов. Известен ряд работ, посвященных исследованию влияния усталостного износа конструкционных материалов на их акустические свойства, в частности, скорость распространения ультразвука [1–2] и коэффициент акустической нелинейности [3–5]. Под коэффициентом акустической нелинейности обычно подразумевается отношение амплитуды второй или третьей гармоники прошедшего через металл сигнала к квадрату его первой (основной) гармоники. Указанные работы посвящены конкретным материалам и не ставят цели системного подхода к изучению зависимостей. Цель работы – исследование влияния усталостного износа при малоцикловой усталости на скорость и акустическую нелинейность углеродистых сталей в диапазоне содержания углерода от 0,1 до 0,45 %.

Приведены результаты измерения скорости распространения ультразвуковых рэлеевских волн и коэффициента акустической нелинейности в углеродистых сталях: Ст. 10, Ст. 20, Ст. 35, Ст. 45. Образцы подвергали усталостному нагружению в диапазоне от 0 до 100 тысяч циклов с шагом 10 тысяч циклов для получения зависимостей акустических свойств от усталостного износа. Скорость распространения рэлеевских волн измерялась контактным датчиком с совмещенными в одном корпусе излучающим и приемным пьезопреобразователями. Измерение коэффициента акустической нелинейности проводилось посредством бесконтактного электромагнитного преобразователя. Показано, что зависимость скорости рэлеевских волн от количества циклов нагружения имеет три участка. Первый участок характеризуется снижением скорости и соответствует этапу приработки в жизненном цикле металлоизделий. На наиболее протяженном втором участке скорость рэлеевских волн остается неизменной, данный участок соответствует эксплуатационному ресурсу металлоизделия. На заключительном участке, соответствующем катастрофическому износу металла, скорость ультразвука снижается. Переход на третью стадию можно характеризовать как критическую точку усталостного износа металла. Параметр акустической нелинейности растет с количеством циклов экспоненциально и практически не зависит от содержания углерода в стали. Критическая точка усталостного износа соответствует уровню 0,01 коэффициента акустической нелинейности.

В результате проведенных исследований было обнаружено, что независимо от содержания углерода в исследованных сталях наблюдаются идентичные зависимости скорости распространения ультразвука и коэффициента акустической нелинейности от степени усталостного износа. На основании полученных зависимостей установлены критерии усталостного износа углеродистых сталей. Полученные зависимости могут быть использованы для неразрушающей оценки состояния металлоконструкций.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2013–2020 гг. и проекта РФФИ № 16-48-700169 р-а.

Список литературы

1. Ohtani, T. Ultrasonic attenuation and microstructural evolution throughout tension–compression fatigue of a low-carbon steel / T. Ohtani, K. Nishiyama, S. Yoshikawa, H. Ogi, M. Hirao // Materials Science and Engineering A, 2006. – 442(1–2). – p. 466–470.

2. Toozandehjani, M. On the correlation between microstructural evolution and ultrasonic properties: a review / M. Toozandehjani, K. A. Matori, F. Ostovan, F. Mustapha, N. I. Zahari, A. Oskoueian // *Journal of Materials Science*, 2015. – 50(7). – p. 2643–665.
3. Nagy, P. B. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic material characterization / P. B. Nagy // *Ultrasonics*, 1998. – 36. – p. 375–381.
4. Kumar, A. Nonlinear ultrasonics for in situ damage detection during high frequency fatigue / A. Kumar, C. Torbet, J. Jones, T. M. Pollock // *Journal of Applied Physics*, 2009. – 106(2):024904. – p. 1–9.
5. Valluri, J. S. Creep damage characterization using non-linear ultrasonic techniques / J. S. Valluri, K. Balasubramaniam, Raghu V. P. // *Acta Materialia*, 2010. – 58. – p. 2079–2090.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ОДНООСНОМ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Лыкова А.В., Ильиных А.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: sem.lykova@gmail.ru, ilinih@yandex.ru*

Оценка остаточного ресурса эксплуатируемого технического изделия является важной задачей механики и связана с оценкой безопасности конструкции. Вопросы изучения закономерностей упругопластического деформирования и прогнозирования циклической долговечности конструкционных материалов и деталей машин актуальны в настоящее время и рассматриваются в работах [1–3].

Работа посвящена изучению закономерностей механического поведения и характеристик малоциклового усталости конструкционных сплавов при постоянных и переменных параметрах цикла одноосного нагружения при растяжении и кручении.

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования усталостных характеристик материала в области малоциклового нагружения при сложных формах цикла с целью оценки влияния сложных форм нагружения на долговечность конструкций.

В работе представлена методология проведения механических испытаний на малоцикловую усталость. Выполнено экспериментальное исследование малоциклового усталости конструкционных сплавов при различных параметрах и формах цикла одноосного нагружения при растяжении и кручении. Проведен анализ характеристик упругопластического деформирования. На основе полученных экспериментальных данных выявлены особенности механического поведения и зависимость усталостной долговечности никелевого сплава от параметров цикла. В работе получены данные сопротивления малоциклового усталости при циклическом одноосном деформировании на кручение конструкционного сплава с переменными параметрами. В ходе работы построены петли механического гистерезиса и зависимости пиковых значений касательных напряжений при циклическом нагружении на кручение при разных формах цикла. В работе рассматриваются вопросы прогнозирования циклической долговечности конструкционных сплавов на основе энергетических и деформационных критериев повреждения. Изучено несколько энергетических критериев, основанных на использовании в качестве критической величины удельной энергии при статическом нагружении и удельной энергии, затраченной на пластическое деформирование. Также для прогнозирования циклической долговечности при сложных формах цикла одноосного нагружения в условиях растяжения–сжатия была применена нелинейная модель суммирования повреждений на основе гипотезы Марко–Старки.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-41-590392).

Литература

1. Экспериментальная проверка модели суммирования повреждений при циклическом нагружении дисков турбин / А. А. Иноземцев, М. Ш. Нихамкин, А. В. Ильиных, А. М. Ратчиев // Известия Самарского НЦ РАН – 2012 – Т. 14, № 4 (5). – С. 1372–1375.
2. Численное моделирование упругопластического деформирования и накопления повреждений в металлах при малоциклового усталости / И. А. Волков, Ю. Г. Коротких, И. С. Тарасов, Д. Н. Шишулин // Проблемы прочности. – 2011 – № 4. – С.147–165.
3. Романов А. Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин // Вестник научно-технического развития – 2015 – № 12 (100). – С. 42–62.

COMPARISON OF FRICTION AND ACOUSTIC EMISSION OF HADFIELD STEEL SINGLE CRYSTALS

Lychagin D.V.^{1,3}, Filippov A.V.^{2,3}, Kolubaev E.A.^{2,3}, Sizova O.V.², Tsvetkov N.A.⁴

¹National Research Tomsk State University,

36, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation,

²Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4, Akademicheskiiy Ave., Tomsk, 634021, Russian Federation,

³National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation,

⁴Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russian Federation,

e-mail: dvl-tomsk@mail.ru

Acoustic emission (AE) analysis is used to test friction. A correlation is established between AE signals, the type and number of formed wear particles wear mechanisms, and the state of the friction surface. Austenitic Hadfield steel is widely known for its high wear resistance. Earlier, together with their colleagues, the authors of this article studied the relationship of the parameters of acoustic emission signals to specific features of friction in polycrystalline Hadfield steel. Despite the work carried out, the variety of processes occurring during friction requires additional experimental studies. It is known that the Hadfield steel has an essential orientation dependence of deformation behavior. The aim of this paper is to establish a relation between the different behavior of single crystals with dry sliding friction and the ensuing change in the parameters of acoustic emission signals.

We investigated Hadfield steel single crystals of two orientations. They have different Schmid factors for systems of sliding and twinning. The samples having a height of 10.0 ± 0.1 mm and a cross section of $3.0 \times 3.0 \pm 0.1$ mm were tested under conditions of sliding friction on a Tribo-Technik pin-on-disk tribometer at a room temperature of 25 °C. The sliding velocity was 0.1 m/s. Acoustic emission signals were recorded using an EYa-2 setup developed at Togliatti State University (Russia) and an MSAE-L2 transducer.

The tests have shown that the friction coefficient (C_{oF}) of the first single crystal is 1.5 times lower than that of the second one. In the first case, in each plane of shear there are directions favorable both for sliding and for twinning. This leads to a lower coefficient of friction and greater wear. In the second case, the orientation of the planes is unfavorable for deformation. This determines a higher coefficient of friction and less wear.

For the single crystals of the first orientation, the pattern of changes in the mean values (0 to 8, 8 to 16, etc. for each eight-hour friction period) of the energy of AE frames ($A_{Eenergy}$) and the median frequency (F_{med}) agrees well with changes in the wear behavior of the Hadfield steel single crystals. At the same time, a high and direct correlation between the wear and energy of the AE signal (correlation coefficient 0.96) and between the wear and the median frequency (0.90) is observed. Consequently, the intensification of deformation (mostly, wear rate increase) leads to an increase in the frequency of AE signals and the AE amplitude (the AE envelope value). For the single crystals of the second orientation, the correlation is inverse and moderate (−0.37) in the first pair of values, and it is direct and strong (0.82) in the second one.

The work was funded by RFBR in the framework of Research Project No. 16-08-00377 a.

We wish to express our gratitude to A. V. Kolubaev, Yu. I. Chumlyakov, A. V. Chumaevsky and E. N. Moskvichev for fruitful discussions and assistance.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ, ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Люкшин П.А.,
Матолыгина Н.Ю., Панин С.В., Реутов Ю.А.

*ИФПМ СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: lba2008@yandex.ru*

Актуальная проблема определения физико-механических характеристик материала, которые проявляются на макроуровне, т. е. на уровне стандартного лабораторного образца, детали или изделия, может решаться экспериментальными методами, тогда связи между параметрами структуры материала и эффективными свойствами, как правило, остаются скрытыми. Второй путь решения этой проблемы заключается в создании физических и математических моделей материала с учетом различных структурных единиц, реализация этих моделей проводится преимущественно методами вычислительной механики.

Теоретические исследования проводятся путем определения детальных распределений параметров состояния в представительном объеме материала (дисперсно-наполненные композиции на полимерных матрицах), а далее с использованием процедур осреднения получают эффективные свойства композиций. Предложенный подход применим практически для любых форм и свойств армирующих включений.

Физико-механические свойства материалов разбиты на три группы: деформационно-прочностные, теплофизические, электрофизические. Детальные распределения параметров, характеризующих поля перемещений, деформаций и напряжений в первой группе, температуры – во второй, диэлектрической проницаемости и электрической проводимости – в третьей группе, получаются из решения краевых задач. В работе используется подход, в соответствии с которым эти задачи решаются на основе вариационных принципов.

Решения получены в 2D- и 3D-постановках.

После получения детальных распределений перемещений, деформаций и напряжений в неоднородном материале проводится процедура осреднения, приводящая к получению эффективных характеристик тела сравнения, для деформационно-прочностных характеристик это модуль упругости и предел прочности.

Аналогичный подход используется во второй и третьей группах задач. В задачах второй группы коэффициент теплопроводности неоднородного материала определялся на основе решения стационарной задачи теплопроводности, когда явно учитывается наличие и геометрия включений в расчетной области, а также теплофизические характеристики включений и матрицы. Получены зависимости коэффициента теплопроводности вспененной композиции от степени наполнения воздухом, а также композиции с повышенной теплопроводностью за счет введения в полимерную матрицу порошков металлов.

Для описания электростатического поля в ячейке используется система уравнений Максвелла, которая сводится к уравнению Лапласа с переменными коэффициентами, так как в разных точках ячейки может оказаться материал включения (железо) или матрицы (полиэтилен).

Для определения потенциала электрического поля постоянного тока в рассматриваемой области решается уравнение Лапласа с граничными условиями, когда на двух гранях задан потенциал, а на двух других – условия симметрии.

Эффективные деформационно-прочностные, электрофизические, теплофизические характеристики композита определяются из условия равенства энергий в структурно-неоднородном теле и в однородном теле сравнения при механических, тепловых, электромагнитных воздействиях. В случае механических воздействий приравниваются потенциальные энергии деформации, в случае тепловых воздействий – количества теплоты, полученные

за конечный промежуток времени. В случае электромагнитных воздействий приравниваются энергии электромагнитных полей и мощности тепловых потерь.

Предложенные и реализованные модели обладают известной общностью постановки краевых задач, алгоритмов их реализации, критериев сравнения неоднородных тел и однородных тел сравнения и позволяют определять достаточно широкий спектр эффективных физико-механических свойств наполненных композиций.

Работа выполнена в рамках проекта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» (Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI60417X0154.

ПОВЫШЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СТАЛИ НУ-TUF ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ В БЕЙНИТНОЙ ОБЛАСТИ

Майсурадзе М.В., Рыжков М.А.

ФГАОУ ВО УрФУ, ул. Мира, д. 28, г. Екатеринбург, 620000, Российская Федерация,
e-mail: spirallog@gmail.com

В настоящее время одной из важнейших проблем машиностроения является повышение надежности при одновременном уменьшении веса деталей. Поэтому сталь для производства таких деталей должна удовлетворять следующим требованиям: суммарное содержание легирующих элементов не более 8 мас. %, достаточная прокаливаемость, высокая прочность при высокой пластичности и вязкости. Сталь НУ-TUF отвечает этим требованиям. Данная сталь обычно используется для производства деталей самолетов, горного оборудования и других тяжело нагруженных деталей. В большинстве случаев механические свойства деталей из стали НУ-TUF достигаются после традиционной закалки и отпуска. Настоящее исследование посвящено исследованию возможности повышения ударной вязкости стали НУ-TUF при сохранении высокой прочности путем реализации изотермической закалки в температурной области формирования бейнита.

Температура аустенитизации стали НУ-TUF составляла 925 °С (выдержка 40 мин). Охлаждение при традиционной закалке производилось в индустриальном масле И20А (40...60 °С). Отпуск производили при температуре 200...600 °С в течение 3 ч. Изотермическая закалка производилась в печи-ванне с расплавом соли (50 % KNO₃, 50 % NaNO₃). Температура изотермической выдержки составляла 330...430 °С, время выдержки – 60 мин. После выдержки образцы охлаждали в закалочном масле.

При температуре отпуска 400 °С в исследуемой стали наблюдалась отпускная хрупкость. Ударная вязкость при этой температуре отпуска составляла 30...35 Дж/см². Повышение температуры отпуска до 600 °С обеспечило увеличение ударной вязкости до 130...140 Дж/см², но при этом прочность стали снизилась от 1400 до 960 МПа.

Ударная вязкость верхнего бейнита, образовавшегося в результате изотермической выдержки при температуре 400...430 °С, оказалась низкой (15...20 Дж/см²) несмотря на значительное содержание остаточного аустенита (до 15...18 %). Причина наблюдаемого явления заключается в выделении карбидов из остаточного аустенита в процессе изотермической выдержки, приводящем к уменьшению в нем концентрации углерода. Чем ниже концентрация углерода, тем ниже устойчивость остаточного аустенита, вследствие чего хрупкий мартенсит образуется при более низких нагрузках.

Снижение температуры изотермической выдержки до 370 °С обеспечило более высокую ударную вязкость (75 Дж/см²) вследствие образования некоторого количества нижнего бейнита, но прочность уменьшилась с 1300...1400 МПа (при температуре выдержки 400...430 °С) до 1180 МПа. Снижение прочности обусловлено более полным бейнитным превращением при температуре 370 °С и, как следствие, меньшим количеством мартенсита в структуре стали. Дальнейшее понижение температуры выдержки ниже M_n (до 330 °С) обеспечило наилучшее сочетание высокой ударной вязкости (115 Дж/см²) и прочности (1330 МПа). Увеличение ударной вязкости объясняется отсутствием карбидов или верхнего бейнита в микроструктуре стали и высокой устойчивостью обогащенного углеродом остаточного аустенита. Повышенная прочность обусловлена образованием некоторого количества «первичного» мартенсита и TRIP-эффектом во время пластической деформации.

Таким образом, сталь НУ-TUF после низкотемпературной изотермической закалки сочетает высокую прочность и высокую ударную вязкость, что позволяет уменьшить сечение деталей для обеспечения требуемой прочности и надежности.

ПРЯМАЯ МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Макаревич Е.С., Кондратьев Н.С., Трусов П.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, д. 29, г. Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: makareviches@inbox.ru, kondratevns@gmail.com, tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Представлена модификация конститутивной модели для описания поведения поликристаллических металлов и сплавов при термомеханических воздействиях; для построения модели используется дискретно-континуальный подход, основанный на применении физических теорий упруговязкопластичности. Подробно структура многоуровневой конститутивной модели поликристаллического материала приведена, например, в статье [1]. В предлагаемой работе основное внимание уделено описанию подмодели, позволяющей описывать реализацию бездиффузионных и диффузионных твердотельных фазовых переходов в структуре материала под действием термомеханических нагрузок.

Под твердотельным фазовым переходом в поликристаллическом материале предполагается полиморфное превращение, заключающееся в изменении типа кристаллической решетки материала на мезо-масштабном уровне в результате приложенных внешних воздействий (нагрузки, температуры и т. д.). Под фазой в работе понимается область зерна, характеризующаяся в фиксированный момент процесса термомеханического нагружения конкретным типом кристаллической решетки, химическим составом, типом твердых растворов и др., с позиций математического моделирования и МДТТ некоторая область материала, поведение которой при деформировании описывается определяющими соотношениями фиксированного типа с заданным (определенным из решения вспомогательных подзадач) набором свойств (внутренних переменных).

В качестве базового компонента модели рассматривается элемент мезоуровня (представительный объем мезоуровня), который в фиксированный момент процесса характеризуется конкретным типом кристаллической решетки (в исходном состоянии – решетки исходной родительской фазы) и заданной (определенной) пространственной ориентацией осей кристаллографической системы координат, связанной с этой решеткой в отсчетной конфигурации. Элемент мезоуровня подвергается термомеханическому нагружению. Воздействие передается с верхнего масштабного уровня. Термическое воздействие на элемент мезоуровня задается в виде температуры и скорости ее изменения, механическое – определяется градиентом скорости перемещений. В результате термомеханического воздействия в элементе мезоуровня при выполнении соответствующего критерия может реализоваться фазовый переход. Принимается гипотеза о том, что в результате фазового превращения дефектная структура элемента исходной фазы наследуется в элементе новой фазы. Фазовый переход в элементе мезоуровня реализуется под действием термодинамической движущей силы (если ее величина превышает некоторое критическое значение). В качестве термодинамического потенциала используется энтропия (как термодинамический потенциал, который может быть использован в неизотермических процессах). Удельная энтропия включает в себя вклад от трех составляющих: химической энергии, поверхностной энергии и энергии упругого деформирования.

Так как модель предполагается в дальнейшем использовать для описания процессов термомеханической обработки, которые характеризуются большими градиентами перемещений, в ее структуре используются геометрически нелинейные кинематические и определяющие соотношения [2]. Постановка задачи осуществляется в актуальной конфигурации в скоростной форме. Для разложения движения (на квазитвердое и деформационное) вводится жесткая подвижная система координат, связанная с решеткой элемента мезоуровня.

Для решения задачи определения напряженно-деформированного состояния, задачи теплопроводности и задачи определения фазового состава в рамках представительного объема макроуровня в работе используется прямая модель. Рассматривается расчетная область, состоящая из нескольких сотен зерен; для численного решения задачи применяется процедура метода конечных элементов. В начальный момент процесса все зерна, а значит – и все элементы мезоуровня в рамках каждого из зерен, полагаются однофазными. В результате действия приложенных нагрузок и температуры каждый элемент мезоуровня (представительный объем мезоуровня) может перейти в новую фазу, если в фиксированный момент процесса выполнится критерий фазового превращения, в результате чего зерна могут стать многофазными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект №9.7434.2017/БЧ) и РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60002 мол_а_дк.

Литература

1. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры / П. В. Трусов, А. И. Швейкин, Е. С. Нечаева, П. С. Волегов // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 33–56.
2. Trusov P. V., Shveykin A. I., Kondratev N. S. Multilevel metal models: Formulation for large displacement gradients // International Journal of Nanomechanics Science and Technology. – 2017. – Vol. 8 (2). – P. 133–166.

НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНО-ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Макаров А.В.^{1,2}, Саврай Р.А.², Малыгина И.Ю.², Волкова Е.Г.¹, Бузов С.В.²

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: av-mak@yandex.ru

²Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия

Дан обзор современных способов интенсивного поверхностного пластического деформирования (ИППД), обеспечивающих упрочнение сталей и сплавов за счет формирования в их поверхностном слое субмикро- и нанокристаллических структур. Важное внимание уделено фрикционным обработкам скользящими инденторами. Сформулированы ключевые технологические факторы, определяющие наиболее эффективное наноструктурирование и деформационное упрочнение поверхностного слоя: 1) нормальная нагрузка (сила), достаточная для формирования новой поверхности (с полностью новым рельефом шероховатости); 2) необходимая кратность деформационного воздействия для накопления деформации; 3) неомогенная деформация сдвигом с наличием резкого градиента; 4) высокий коэффициент трения для усиления сдвиговой деформации; 5) использование безокислительной среды обработки с целью предотвращения охрупчивания кислородом воздуха и последующего разрушения (изнашивания) формируемого диффузионно активного наноструктурированного слоя. Указанные факторы определяют условия для реализации ротационного механизма пластической деформации, ответственного за наноструктурирование металлических материалов.

На основе указанных технологических подходов, учитывающих современные представления об оптимизации условий наноструктурирования сплавов, разработан новый способ поверхностного наноструктурирования и упрочнения – ультразвуковая ударно-фрикционная обработка (УЗУФО)¹. Указанный способ развивает известный метод деформационного упрочнения – стандартную ультразвуковую ударную обработку (УЗУО), которая с момента своего появления (И.И. Муханов, В.П. Северденко и др.) обычно проводится при наличии смазки и воздействии индентора, колеблющегося с ультразвуковой частотой, по нормали (под углом 90°) к обрабатываемой поверхности. Такая обработка часто не обеспечивает накопления максимальных степеней пластической деформации в поверхностном слое достаточной толщины и соответственно его наиболее эффективного упрочнения. УЗУФО, повышающая эффективность применения УЗУО для упрочнения металлических поверхностей, проводится, во-первых, по методу наклонного удара пульсирующего индентора (под углом к обрабатываемой поверхности, меньшим 90°). Это позволяет усилить фрикционную составляющую взаимодействия индентора с металлом и, соответственно, увеличить сдвиговую составляющую пластической деформации. Во-вторых, УЗУФО предлагается проводить без применения контактной жидкости для обеспечения более высокой деформации поверхностного слоя вследствие роста коэффициента (силы) трения с использованием защитной газовой атмосферы, предотвращающей охрупчивание высокодисперсного поверхностного слоя кислородом. В результате достигается рост упрочнения и толщины упрочненного слоя.

На примере двух конструкционных сталей (сталь 50 и 09Г2С) продемонстрирована высокая эффективность УЗУФО для упрочнения и наноструктурирования поверхностного слоя при варьировании угла наклона колеблющегося индентора и среды обработки. Особое внимание уделено также обеспечению высокого качества поверхностей сталей после УЗУФО, которую можно отнести к финишной наноструктурирующей деформационной обработке.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России по теме «Структура» № 01201463331 (проект № 18-10-2-39) и ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4.

¹Патент РФ № 2643289 / МПК В24В 39/00. Способ ультразвуковой упрочняющей обработки деталей / А.В. Макаров, И.Ю. Малыгина, С.В. Буров, Р.А. Саврай. – Оpubл. в БИМП. – 2018. – № 4.

Способ ультразвуковой упрочняющей обработки деталей : пат. 2643289 Рос. Федерация / Макаров А. В., Малыгина И. Ю., Буров С. В., Саврай Р. А. – опубл. в БИМП. – 2018. – № 4.

УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ СКЛЕРОМЕТРИИ, АЗОТИРОВАННОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРОВЕДЕНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Лежнин Н.В.¹, Макаров А.В.^{1,2}, Гаврилов Н.В.³, Осинцева А.Л.², Саврай Р.А.²

¹ИФМ УрО РАН, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: nlezhnin@bk.ru

²ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,

³ИЭФ УрО РАН, д. 106, ул. Амундсена, г. Екатеринбург, 620016, Российская Федерация

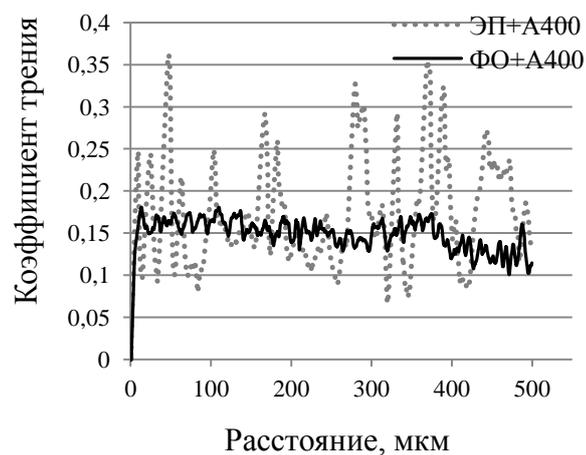
Проведение наноструктурирующей фрикционной обработки перед операцией азотирования в плазме электронного пучка позволяет снизить температуру эффективного азотирования до 350–400 °С [1]. Помимо увеличения прочности поверхностного слоя, важным аспектом при проведении финишных обработок считается улучшение трибологических свойств и качества поверхности. В работе рассмотрено влияние предварительной деформационной поверхностной обработки на качество поверхности и трибологические свойства при склерометрических испытаниях азотированного слоя.

Закаленные в воде от 1100 °С пластины стали 04X17H8T подвергались комбинированной обработке, включавшей фрикционную обработку скользящим индентором из синтетического алмаза для создания поверхностного слоя с диспергированной структурой (вплоть до наноструктуры) и улучшения диффузии в металл, с последующим азотированием в плазме электронного пучка в течение 4 ч при температуре 400 °С. По результатам склерометрических испытаний коническим индентором с линейно возрастающей нормальной нагрузкой образцы, подвергавшиеся предварительной фрикционной обработке, продемонстрировали существенно более высокое сопротивление разрушению азотированного слоя. В случае азотирования исходного закаленного крупнокристаллического состояния в модифицированном слое возникают трещины напряжения и крупные сколы. Предварительная фрикционная обработка ограничивает развитие указанных процессов разрушения поверхностного слоя. При этом глубина внедрения индентора меньше в 2 раза, чем при нагружении азотированной крупнокристаллической стали, и в 3 раза, чем в случае исходного закаленного состояния.

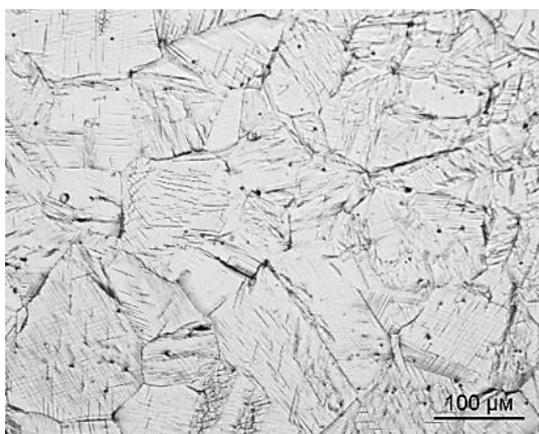
Микросклерометрические испытания коническим индентором с алмазным наконечником диаметром 50 мкм при постоянной нормальной нагрузке 300 мН (30 г) показали, что средние значения коэффициента трения находятся на близких уровнях – 0,15 и 0,17 для азотирования после фрикционной обработки и после электролитической полировки соответственно. В случае предварительной деформационной обработки коэффициент трения в процессе испытания находится приблизительно на одном уровне (рис. а), в то время как для крупнокристаллического состояния наблюдается сильный разброс значений коэффициента трения – более чем в три раза в диапазоне от 0,10 до 0,35 (рис. а), что говорит о нестабильности трибологических свойств на микроуровне.

Установленное улучшение трибологических свойств азотированного слоя (рост сопротивления разрушению и стабилизация коэффициента трения при склерометрических испытаниях) обусловлено большей глубиной азотированного слоя в случае предварительной фрикционной обработки и более высоким качеством азотированной поверхности. Азотирование после фрикционной обработки не приводит к формированию микрорельефа, характерного для азотирования исходного крупнокристаллического состояния (рис. б, в), а среднее значение параметра Ra (среднеарифметического отклонения профиля шероховатости) снижается с 0,87 до 0,19 мкм.

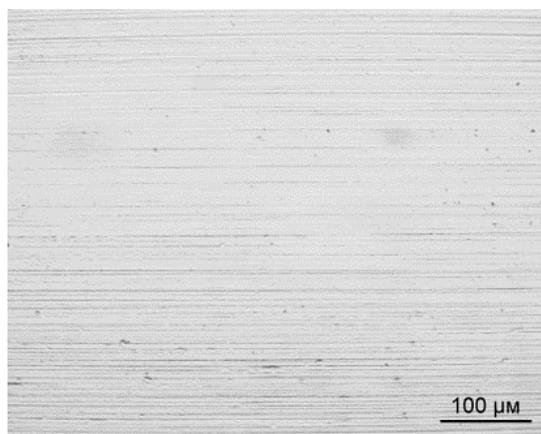
Таким образом, предварительная фрикционная обработка является эффективным способом улучшения качества и трибологических характеристик поверхности аустенитной стали, азотированной в плазме электронного пучка, что особенно важно для операций финишной обработки деталей.



a



б



в

Коэффициенты трения при $P = 300$ мН (*a*) и поверхность азотированной стали 04X17H8T: *б* – без предварительной фрикционной обработки (ЭП+А400); *в* – после предварительной фрикционной обработки (ФО+А400)

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН (проект № 18-10-2-39) и государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790148-1.

Effect of preliminary nanostructuring frictional treatment on the efficiency of nitriding of metastable austenitic steel in electron beam plasma / A.V. Makarov, G.V. Samoilova, N.V. Gavrilov, A. S. Mamayev, A. L. Osintseva, T. E. Kurennykh, R. A. Savrai // AIP Conference Proceedings. – 2017. – 1915. – P. 030011. – DOI: 10.1063/1.5017331.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Бадриев И.Б.¹, Макаров М.В.^{1,2}, Паймушин В.Н.^{1,2}, Холмогоров С.А.²

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
18, ул. Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,

²Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева,
10, ул. К. Маркса, Казань, 420111, Российская Федерация,
e-mail: Ildar.Badriev1@mail.ru, makarovmaksim@mail.ru, vpajmushin@mail.ru, hkazan@yandex.ru

Рассмотрена геометрически нелинейная задача об осесимметричном деформировании трехслойной цилиндрической оболочки с трансверсально-мягким заполнителем, подкрепленной в торцевых сечениях упругими стержнями, предназначенными для обеспечения передачи нагрузки на несущие слои при взаимодействии с другими элементами конструкций. Используются полученные ранее уравнения уточненной геометрически нелинейной теории [1–3], позволяющие описать процесс их докритического деформирования и выявить все возможные формы потери устойчивости несущих слоев (синфазные, антифазные, смешанные изгибные и смешанные изгибно-сдвиговые, а также произвольные, включающие в себя все выше перечисленные). Указанные уравнения основаны на введении в рассмотрение в качестве неизвестных контактных усилий взаимодействия внешних слоев с заполнителем, а также внешних слоев и заполнителя с подкрепляющими телами во всех точках поверхностей их сопряжения.

Разработаны численные методы решения сформулированных задач. Они основаны на предварительном сведении исходных задач к системе интегро-алгебраических уравнений, при решении которых используется метод конечных сумм. Предложена методика исследования докритического и закритического геометрически нелинейного поведения оболочки при ее торцевом сжатии через контурные подкрепляющие стержни, согласно которой неустойчивые положения равновесия определяются методом продолжения решения по параметру при выборе в качестве параметра работы внешних сил. Предложен способ нахождения критической нагрузки (точки бифуркации), при достижении которой оболочка теряет устойчивость. Он основан на линеаризации исходной геометрически нелинейной задачи в окрестности ее нелинейного решения с последующей формулировкой задачи на собственные значения с нелинейным вхождением параметра [4, 5]. Приведены результаты численных экспериментов. Проведен анализ результатов экспериментов.

Результаты исследований получены за счет гранта РФФИ (проект № 16-08-00316, постановка задач и вывод основных уравнений) в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 9.5762.2017/ВУ (проект № 9.1395.2017/ПЧ, проведение численных экспериментов и анализ их результатов).

Литература

1. Paimushin V. N. Theory of Moderately Large Deflections Of Sandwich Shells Having A Transversely Soft Core And Reinforced Along Their Contour // *Mechanics of Composite Materials*. – 2017. – Vol. 53, no. 1. – P. 1–16.
2. Badriev I. B., Makarov M. V., Paimushin V. N. Contact statement of mechanical problems of reinforced on a contour sandwich plates with transversally-soft core // *Russian Mathematics*. – 2017. – Vol. 61, no. 1. – P. 69–75.
3. Badriev I. B., Makarov M. V., Paimushin V. N. Longitudinal and transverse bending by a cylindrical shape of the sandwich plate stiffened in the end sections by rigid bodies // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 158 (1). – Art. no. 012011.
4. Badriev I. B., Banderov V. V., Makarov M. V. Mathematical Simulation of the Problem of the Pre-Critical Sandwich Plate Bending in Geometrically Nonlinear One Dimensional Formulation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 208 (1). – Art. no. 012002.
5. Numerical Solution of the Issue about Geometrically Nonlinear Behavior of Sandwich Plate with Transversal Soft Filler / I. B. Badriev, G. Z. Garipova, M. V. Makarov, V. N. Paymushin // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2015. – Vol. 10, no. 8. – P. 428–435.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТНО-ПРОЕКТИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ ПРЕЦИЗИОННОГО КЛАССА

Максименко А.А., Перфильева Н.В., Борисова А.Д.

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
46, пр. Ленина, г. Барнаул, 656038, Российская Федерация,
e-mail: max.astu@mail.ru*

Сегодня крайне мало методик, позволяющих прогнозировать эксплуатационные характеристики на стадии проектирования. Так, пренебрежение контактной жесткостью в цилиндрическом соединении с натягом ведет к ошибке определения давления в сопряжении до 10–20 % при большом и до 40 % при малом натягах, а в прецизионном машиностроении погрешность в расчетах без учета контактных деформаций может достигать 70 %.

В работе исследуется прецизионное конусное соединение трубопровода и штуцера топливного насоса высокого давления при статическом и динамическом нагружении. Это соединение является ответственным и работает в условиях значительных динамических перепадов давления в системе. Выход из строя соединения ведет к нарушению герметичности и как следствие потери работоспособности топливного насоса высокого давления. Однако в инженерных расчетах на прочность и жесткость прецизионных конусных соединений не учитываются перемещения на контактных участках сопряжения в пределах трения покоя.

На основе принятой физико-математической модели для случая вынужденных касательных контактных колебаний с учетом того, что тангенциальное динамическое воздействие подчиняется следующему закону: $P \sin \omega \cdot t$, дифференциальное уравнение движения подвижного тела контактной пары имеет вид:

$$m \ddot{\Delta} + \Phi(\Delta) = P \sin \omega t, \quad (1)$$

где $\Phi(\Delta)$ – нелинейная функция, характеризующая восстанавливающую силу и диссипацию энергии одного периода, записывается в виде кусочно-нелинейных функций, выраженных полиномами Тейлора.

Сопряжение работает одновременно под воздействием нормальной и тангенциальной составляющих внешнего динамического воздействия, изменяющихся во времени. Установлено, что для упругого контакта на колебания в нормальном направлении тангенциальная составляющая оказывает незначительное воздействие. Исходя из этого, задача оценки поведения контактной пары при произвольном направлении внешнего воздействия к плоскости контактирования заключается в определении контактных касательных колебаний.

В работе разработан численно-аналитический метод определения статических и динамических характеристик контакта деталей. Рассмотрены прецизионные конусные соединения, которые могут быть использованы в ответственных изделиях.

Сопrotивляемость конусных соединений осевому сдвигу не одинакова в различных направлениях. Если нагрузка направлена против вершины конуса, то сдвигу препятствует сила трения на посадочной поверхности, а также осевая составляющая реакции упругого сжатия охватываемой детали.

Далее было произведено сравнение инженерного расчета и расчета с учетом контактной податливости. При этом фактическая площадь контакта в сопряжении определяли по формуле:

$$A_{\text{факт}} = A_0 \cdot \left(\frac{q_0}{\sigma_T} \right)^{1 - \frac{q_0}{\sigma_T}}, \quad (2)$$

где A_0 – номинальная площадь; σ_T – предел текучести.

Величина сближения определяется по формуле Крагельского–Демкина.
С учетом контактной податливости контурное давление определяли выражением

$$q_{0\text{факт}} = \frac{\Delta}{2 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) + K_s} \quad (3)$$

Оценочные расчеты показали, что осевой натяг с учетом контактных деформаций на 20 % ниже осевого натяга, определенного инженерным расчетом.

Также были получены амплитудно-частотные характеристики механического контакта и контактная податливость прецизионного конусного соединения при динамическом нагружении.

Полученные результаты дают возможность оценить величину диссипации механической энергии в контакте.

Наличие шероховатости меняет картину динамических процессов в контакте сопряжения следующим образом: частота возрастает; амплитуда снижается; коэффициент поглощения механической энергии возрастает и соответственно растет количество энергии, которое рассеяно контактом. Увеличение статической контактной жесткости ведет к падению поглощающей способности контакта и снижению максимальных амплитуд резонансной области. При возрастании коэффициента трения увеличивается динамическая контактная податливость сопряжения. Это обусловлено ослаблением контакта за счет изменения условий трения.

Проведена оценка влияния коэффициента трения, крутящего момента, конусности и параметров микрогеометрии на величину осевого натяга.

При инженерном расчете величина осевого натяга имеет линейную зависимость от крутящего момента, поэтому при увеличении момента осевой натяг увеличивается прямо пропорционально. При учете деформаций в контакте зависимость становится нелинейной. В этом случае наглядно можно увидеть, при каком крутящем моменте произойдет срыв соединения. Это происходит когда контурное давление становится равным пределу текучести материала ($q_0 = \sigma_T$). В этот момент $A_0 = A_{\text{факт}}$ фактическая площадь становится равной номинальной, т.е. происходит срыв.

Были проведены экспериментальные исследования контактных перемещений в прецизионном конусном соединении. Исследование проводилось с помощью голографического интерферометра.

Обработка расчетных и экспериментальных данных показала, что расхождение результатов не превышало в среднем 10–15 %. Факт расхождения можно объяснить адгезией, неучтенной в расчетных выражениях.

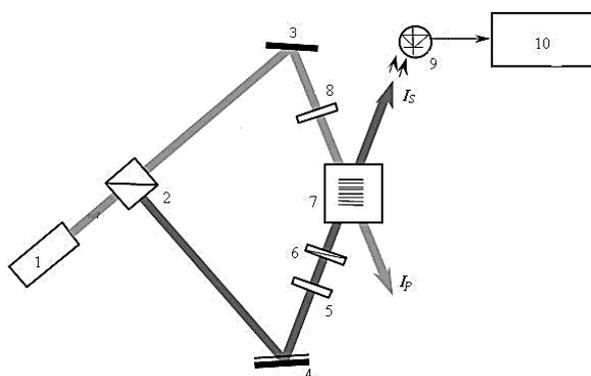


Схема адаптивного голографического интерферометра: 1 – лазер; 2 – оптический делитель; 3 – неподвижное зеркало; 4 – исследуемое коническое соединение; 5, 8 – четвертьволновые пластины; 6 – поляризатор; 7 – фоторефрактивный кристалл; 9 – фотоприемник; 10 – селективный вольтметр

При изучении зависимости амплитуды и периода нормальных и касательных контактных колебаний от параметров микрогеометрии поверхностного слоя контактирующих поверхностей прецизионного конусного соединения было установлено, что уменьшение параметров микрогеометрии приводит к уменьшению амплитуды как нормальных, так и касательных колебаний с возрастанием частоты процесса. С уменьшением максимальной высоты микронеровностей, динамическая контактная податливость в нормальном и тангенциальном направлениях уменьшается.

При уменьшении углов конических поверхностей уменьшается усилие затяжки, а при увеличении – усилие затяжки увеличивается. При этом увеличение сил на контакте трубопровода с большей конической поверхностью штуцера усиливает эффект их взаимного самоторможения и одновременно повышает герметичность соединения.

В ходе проведенных исследований разработан метод неразрушающего контроля соединений деталей машин с заданными динамическими характеристиками и прогнозированной работой узлов деталей машин, который является уточненным инженерным методом, используемым при конструировании и расчете прецизионных конструкций. Полученные закономерности изменения контактной прочности и жесткости позволяют оценить на этапе проектирования соединения, прогнозируемые статические и динамические нагрузки при различных физико-механических и микрогеометрических параметрах контактирования.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ АЛЬФА-ТИТАНА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Неласов И.В., Липницкий А.Г., Картамышев А.И., Максименко В.Н., Колобов Ю.Р.

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
85, Победы, Белгород, 308015, Российская Федерация,
e-mail: Slavik975@yandex.ru*

Титан с ГПУ решеткой, альфа-титан, широко используется в современной промышленности и медицине благодаря его низкой удельной плотности в сочетании с высокой прочностью, биосовместимостью и коррозионной стойкостью. При этом пластическая деформация альфа-титана играет большую роль в формировании его свойств, включая формирование мелкозернистой структуры для дополнительного повышения прочности в соответствии с требованиями конкретных приложений. К настоящему времени механизмы пластической деформации альфа-титана в условиях невысоких температур, давлений и скоростей деформации хорошо изучены [1]. Особенности процесса деформации на атомном уровне изучаются с использованием компьютерного моделирования методом молекулярной динамики, которое позволяет получать информацию на уровне детальности, не доступном экспериментальным методам исследований. Недавние исследования деформации альфа-титана в условиях одноосного напряжения вдоль направления [0001] методом молекулярной динамики выявили детали механизма двойникования и реализации плоскостей скольжения, хотя конкретные характеристики этого процесса оказались существенно зависимыми от используемых межатомных потенциалов [2]. Получаемая информация о деталях процесса деформации служит основой прогноза пластической деформации металлических материалов и конструкций из них в рамках континуальных подходов [3]. Вместе с тем, механизмы деформации альфа-титана в условиях высокоэнергетических воздействий, интерес к которым в настоящее время возрос, остаются не установленными. Также остается проблема существующих межатомных потенциалов в значительном занижении энергии образования дефекта упаковки в ГПУ решетке титана [3], величина которой во многом определяет развитие процесса пластической деформации в альфа-титане.

В предлагаемом докладе изложены результаты молекулярно-динамического моделирования высокоскоростной деформации альфа-титана при повышенных температурах и давлении, имитирующих условия высокоэнергетических воздействий. Используются модифицированный межатомный потенциал для моделирования омега, альфа и бета фаз титана с учетом зависимости энергии взаимодействия от углов между связями [3], который прогнозирует энергию образования дефекта упаковки в ГПУ решетке титана в хорошем согласии с известными экспериментальными данными. Из результатов моделирования показано, что высокоскоростная деформация альфа-титана начинается с флуктуационного инициирования призматических плоскостей скольжения (10–10) с вектором Бюргерса дислокаций в направлении [11–20]. Далее эти плоскости служат источниками зарождения омега фазы, преобразование в которую реализует механизм пластической деформации альфа-титана на следующей стадии. Процесс высокоскоростной пластической деформации альфа-титана заканчивается переходом в омега-фазу всего моделируемого образца за исключением небольших остаточных областей исходного альфа-титана, которые не преобразуются в омега-фазу из-за различий атомных объемов ГПУ и С32 решеток титана. Полученные результаты обосновывают новый механизм высокоскоростной деформации альфа-титана, включающий альфа-омега переход.

Работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках проекта No. 3.3144.2017.

Литература

1. Lütjering G, Williams JC (2007) Titanium. Engineering materials processes. Springer, Berlin, 442 p.
2. S. Rawat, N. Mitra // Computational Materials Science. – 2018, Vol. 141, P. 19–29.
3. A. Kartamyshev et al. // BSU Sci. Bull. Math. Phys. – 2016, 241, P. 117–128.

PROGRESSIVE FAILURE ANALYSIS OF VARIABLE STIFFNESS COMPOSITE STRUCTURES

Malakhov A.V.¹, Polilov A.N.¹, Tian X.²

¹*Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences,
4 Malyy Kharitonievskiy Lane, Moscow, 101990, Russian Federation, e-mail: anmaviko@gmail.com*

²*State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University,
28 Xian Ning West Road, Xi'an, 710049, China*

Composite materials such as fiber-reinforced polymers (FRPs) are widely used in various branches of industry due to their unique properties. However, traditional design methods and manufacturing technologies very rarely allow the realization of their full potential. This is especially noticeable in joints and structural elements, which, for various reasons, must contain geometric discontinuities (holes, notches, and so on). Unfortunately, it is impossible for straight fibers to be adapted to the geometric discontinuities or non-uniform loads, since the rectilinear reinforcement structure in FRPs is traditionally used. Nevertheless, another approach for reinforcement of composite materials can be seen in nature, where one observes curved fibers, for example, in wood, namely in “branch–trunk” or “trunk–root” junctions. Thus, a transition from rectilinear reinforcement to curvilinear opens up the possibility of fiber adaptation to geometric discontinuities and non-uniform loading, which leads to a more effective use of FRPs.

This investigation focuses on estimating the strength of variable-stiffness composite structures (VSCSs) (curvilinear reinforcement), which are simulated by means of a design method developed earlier. In this case, a rectangular plate with a hole under tensile loading is considered. It is supposed that the fiber trajectories are curvilinear, continuous, and located along the lines of maximum principal stress. On the basis of these trajectories, the VSCSs are simulated in view of the changes in the fiber direction and the distance between the fiber trajectories. The simulation and solution are obtained using the finite element method, where each element of this structure has its own mechanical properties, depending on the distribution of curved fibers. The material property degradation method (MPDM) is used to model progressive damage in the composite structures. The damage of the matrix and fibers in the VSCS is determined by the Hashin criterion. If damage occurs in an element, then an undamaged material in the element is replaced by another material with degraded properties. Total plate failure occurs when the fibers are broken across the entire width of the plate; i.e. the fiber failure in the elements extends from the hole to the plate free-edge. The ultimate load corresponds to the maximum value of the stress–displacement curve for the plate. Due to the simulated heterogeneity in the fiber volume fraction in the VSCSs, the strength of the composite material is changed locally. The influence of the fiber volume fraction on the strength of the VSCSs is taken into account in the MPDM. The progressive damage is analyzed and the ultimate load for the plate is estimated with both rectilinear reinforcement and curvilinear reinforcement.

It is demonstrated that the value of the ultimate load for the VSCS plate is 1.6 times higher than the value for the same plate but using rectilinear reinforcement under identical conditions and with the same number of fibers. Thus, it is obvious that growth of the load-carrying capability of composite structures can be achieved by a transition from rectilinear reinforcement to curvilinear.

This work done with a financial support from RFBR and NSFC under projects 18-58-53020 and 5171101485.

ДИНАМИКА ДИСЛОКАЦИЙ ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Малашенко В.В.

*Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина,
72, ул. Р. Люксембург, Донецк, 283114, Российская Федерация,
e-mail: malashenko@fti.dn.ua*

Глубокое понимание элементарных процессов пластической деформации является одним из необходимых условий создания новых функциональных материалов с улучшенными механическими свойствами. Основными носителями пластической деформации являются дислокации. Двигаясь по кристаллу под действием внешних и внутренних напряжений, дислокация взаимодействует с другими структурными дефектами, затрудняющими ее перемещение, в результате чего происходит упрочнение материала. Преодоление движущейся дислокацией потенциальных барьеров, созданных структурными дефектами, может происходить двумя способами. Медленно движущиеся дислокации, кинетическая энергия которых оказывается меньше высоты потенциальных барьеров, созданных дефектами, останавливаются перед барьерами и преодолевают их с помощью тепловых флуктуаций. Кинетическая энергия быстро движущихся дислокаций превосходит высоту энергетических барьеров, такие дислокации преодолевают препятствия динамическим образом, без термических флуктуаций. Это так называемая динамическая область скоростей, нижняя граница которой определяется неравенством, где c – скорость распространения поперечных звуковых волн в кристалле, т. е. включает в себя с дислокационные скорости в десятки, сотни и тысячи метров в секунду [1]. В последние годы интерес к исследованиям в этой области значительно возрос, поскольку бурное развитие науки и техники позволило реализовать процессы, в которых определяющую роль играют именно динамические эффекты. Это высокоскоростная обработка материалов, динамическое канально-угловое прессование, ударно-волновое воздействие [2], в частности создаваемое коротковолновым лазерным излучением огромной мощности и высокоэнергетическими корпускулярными потоками, использование взрыва для обработки и сварки металлов. Интенсивное развитие численных методов, в частности метода молекулярной динамики, позволило получить наглядное представление о происходящих при этом динамических процессах, однако ряд экспериментальных данных не получил теоретического объяснения. Это немонотонная зависимость предела текучести от скорости деформации и, в частности, наличие области отрицательной скоростной зависимости, линейная зависимость константы динамического торможения дислокаций точечными дефектами от их параметра несоответствия и скорости дислокационного скольжения, корневая зависимость этой константы от концентрации этих дефектов. Развитая теория динамического взаимодействия структурных дефектов позволяет решить широкий круг задач дислокационной динамики, объясняет упомянутые выше экспериментальные закономерности и предсказывает существование новых динамических эффектов, тем самым стимулируя целенаправленную постановку новых экспериментов [3–5]. Эта теория основана на модифицированной нами струнной модели Гранато–Люкке, в рамках которой дислокация рассматривается как струна с эффективным линейным натяжением и эффективной массой полевого происхождения.

Литература

1. D. Tramontina, E. Bringa, P. Erhart, J. Hawreliak, T. Germann, R. Ravelo, A. Higginbotham, M. Suggit, J. Wark, N. Park, A. Stukowski, Y. Tang. *High Energy Density Physics* **10**, 9 (2014).
2. Ф.Х. Мирзоев, В.Я. Панченко, Л.А. Шелепин. *УФН*, **166**, 3 (1996).
3. V.V. Malashenko. *Physica B: Phys. Cond. Mat.*, **404**, 3890 (2009).
4. В.В. Малашенко. *ЖТФ*, **87**, 791 (2017).
5. В.В. Малашенко, Письма в *ЖТФ*, **43**, 36 (2017).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДОВ СТАЛЬ-ДИЭЛЕКТРИК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХМИНИАТЮРНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Катасонов А.О.¹, Маликов В.Н.¹, Дмитриев С.Ф.¹, Ишков А.В.², Сагалаков А.М.¹

¹Алтайский государственный университет,
61, Ленина пр-т, Барнаул 634049, Российская Федерация,
e-mail: osys11@gmail.com

²Алтайский государственный аграрный университет,
19, Красноармейский пр-т, Барнаул, 634049, Российская Федерация,
e-mail: mirotnas@gmail.com

Электротехническую сталь применяют для производства различных электротехнических изделий. С учетом областей применения данных сталей, контроль качества изделий, изготавливаемых из подобных материалов, является актуальной задачей.

Эффективным методом исследования физико-механических характеристик стали является вихретоковый метод [1]. Вихретоковый метод – широко применяющийся метод неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с вызываемыми этим полем вихревыми токами.

Для анализа характеристик электротехнических сталей с использованием вихретокового преобразователя необходимо получить зависимости, характеризующие величину отклика вихретокового преобразователя (ВТП) при изменении различных параметров. Это позволяет разработать датчик для измерений стали, оптимизировать его параметры и делать выводы о состоянии исследуемого объекта в зависимости от отклика преобразователя.

Для измерения эпюра напряжения ВТП на границе *диэлектрик – проводящее ферромагнитное пространство* использовалась установка на основе ВТП [2]. Характеристики разработанных ВТП позволяют эффективно локализовать магнитное поле в пределах участка 2500 мкм².

Эксперимент проводился с участием двух материалов, расположенных на расстоянии 1 см друг от друга. Сканирующие измерения первоначально проводились с электротехнической сталью 1212 (образец № 1), через диэлектрик (бумагу) и заканчивались на стали 3414 (образец № 2).

Для детального изучения падения вносимого напряжения на границе ферромагнетик–диэлектрик была построена зависимость амплитуды вносимого напряжения от положения датчика, демонстрирующая изменения амплитуды вносимого напряжения в процессе изменения положения датчика. График зависимости вносимого напряжения от положения датчика наглядно показывает, какие эффекты происходят на границе раздела (рис. 1.)

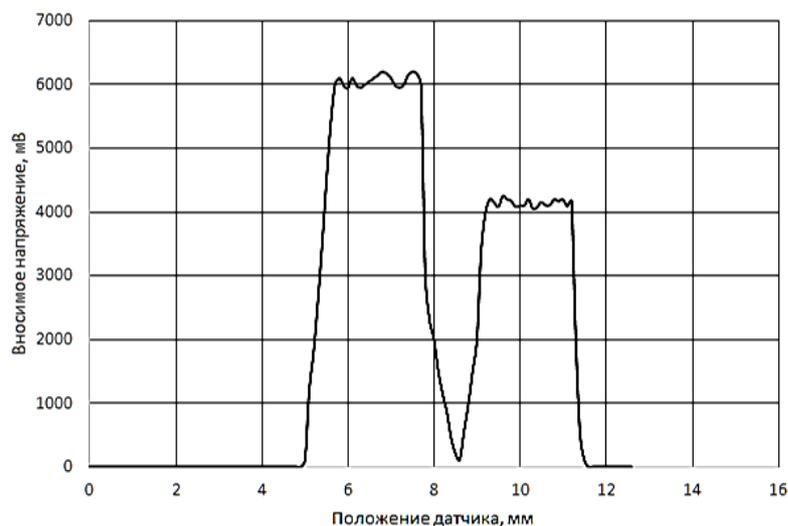


Рис. 1. Зависимость вносимого напряжения от положения датчика при непрерывном сканировании

Разность высоты пиков на графике зависит от проницаемости электротехнической стали. Из графика видно, что в области диэлектрика вносимое напряжение резко падает от значения 6000 мВ до значения 2000 мВ и далее плавно стремится к нулю. Для более детального изучения падения вносимого напряжения на границе *ферромагнетик–диэлектрик* мы построили дискретную зависимость амплитуды вносимого напряжения от положения преобразователя (рис. 2.). Измерения проводились в точках, находящихся на расстоянии 0,1 мм. Из результатов данного эксперимента вытекает следующий вывод: на границе раздела отклик ферромагнетика не прекращается резко до нуля, а убывает по квадратичному закону (*область 1*). Минимальное значение амплитуды вносимого напряжения составляет 50 мВ. Возрастание амплитуды сигнала по мере приближения ко второму образцу стали происходит по закону, близкому к экспоненциальному (*область 2*).

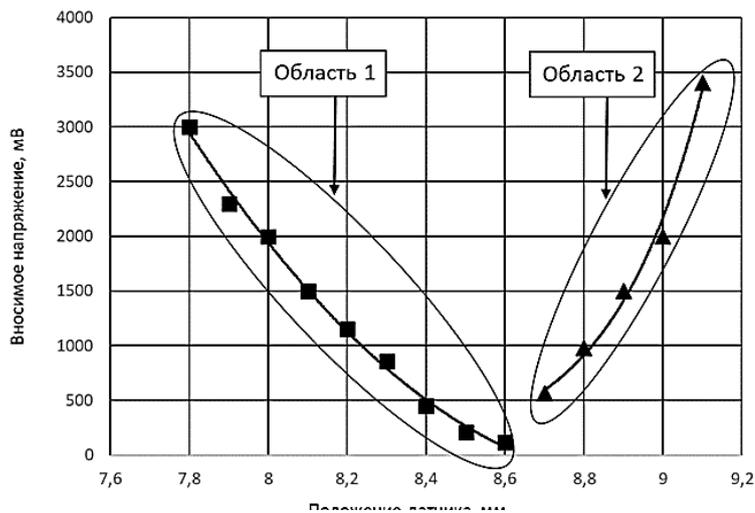


Рис. 2. Зависимость амплитуды вносимого напряжения от положения датчика при дискретном сканировании

Такая зависимость объясняется остаточным напряжением в обмотках ВТП. В поле электротехнической стали выделяются замкнутые силовые линии. При этом значение вносимого напряжения значительно меньше напряжения, вносимого в обмотки преобразователя при размещении датчика непосредственно над сталью. Данное напряжение продолжает уменьшаться с увеличением расстояния между датчиком и объектом исследования. Приближение ко второму образцу вызывает увеличение амплитуды вносимого напряжения. При этом магнитное поле второго образца влияет на датчик одновременно с магнитным полем первого образца. Экспоненциальный рост амплитуды вносимого напряжения вызывается сложением ЭДС полей от двух образцов стали.

Литература

1. Shaternikov V., Filinov V., Arakelov P. The monitoring of technological stresses by the method of magnetic noise / Shaternikov Victor // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50 (12). – P. 748–759. – DOI: 10.1134/S1061830914120043.
2. Flaw detection of alloys using the eddy-current method/ V. Malikov, S. Dmitriev, A. Sagalakov, A. Katasonov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52 (1). – P. 32–37. – DOI: 10.1134/S1061830916010058.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ АКТИВАЦИИ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН МАРКИ УВИС-АК-П

Маркова М.А., Петрова П.Н.

*Институт проблем нефти и газа СО РАН,
ул. Автодорожная, 20, г. Якутск, 677007, Российская Федерация,
e-mail: markovamusya@mail.ru*

Среди полимерных материалов, применяемых для изготовления деталей узлов трения, наиболее предпочтительным комплексом триботехнических и физико-механических свойств обладают композиты на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), что обуславливает их широкое использование в узлах трения машинного оборудования нефтехимических, нефтеперерабатывающих и горнодобывающих производств [1, 2]. Для устранения основных недостатков ПТФЭ, таких как высокий коэффициент линейного термического расширения, низкая износостойкость и способность деформироваться в нормальных условиях даже при небольших нагрузках, перспективно использовать углеродные наполнители-модификаторы различной дисперсности и формы частиц [3]. В качестве углеродного наполнителя ПТФЭ использован углеродный волокнистый активированный материал марки УВИС-АК-П на основе гидратцеллюлозного углеродного волокна производства ООО НПЦ «УВИКОМ» (Россия).

Цель данной работы – исследование зависимости физико-механических и триботехнических свойств ПКМ на основе ПТФЭ и углеродных волокон марки УВИС-АК-П от режимов активации компонентов композита.

ПКМ получали путем смешения компонентов в высокоскоростном лопастном смесителе при разных скоростях. Концентрация наполнителя в полимерной матрице составляли 1–5 %. Для усиления адгезионного взаимодействия компонентов ПКМ в работе использована технология совместной активации компонентов в планетарной мельнице при разной скорости вращения барабанов в течение 2 мин, при этом для улучшения качества смешения компонентов использована технология смешения в 2 приема: 1) введение наполнителя в часть полимера, затем смешение полученной порошковой композиции с остальной массой полимера (рис. 1); 2) смешение части полимера с наполнителем в планетарной мельнице при скорости вращения барабанов 200–400 об/мин, затем смешение полученной порошковой композиции с остальной массой полимера (рис. 2).

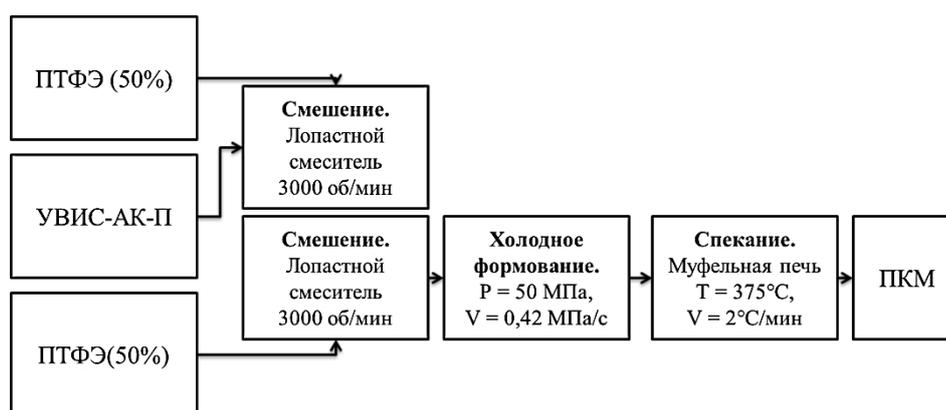


Рис. 1. Этапы изготовления ПКМ методом введения наполнителя через концентрат

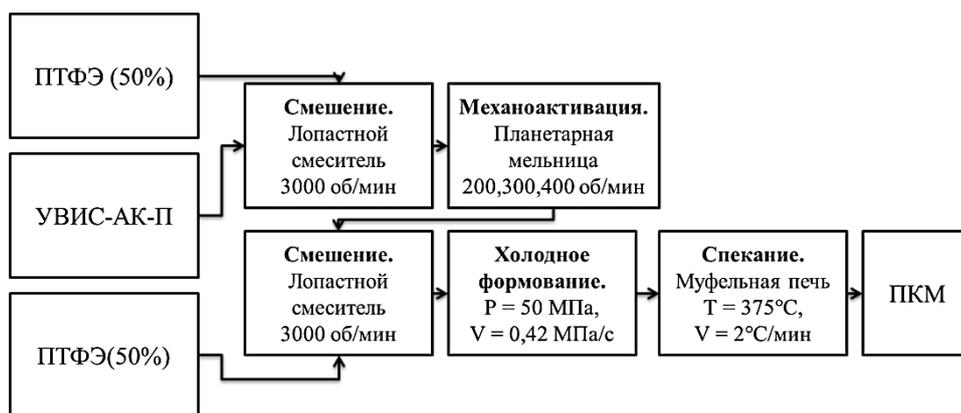


Рис. 2. Этапы изготовления образцов ПКМ методом введения наполнителя через концентрат с использованием технологии совместной механоактивации компонентов со скоростью 200–400 об./мин

Заключение

Разработаны технологические приемы введения УВИС-АК-П в полимерную матрицу, обеспечивающие повышение (улучшение) физико-механических и триботехнических характеристик ПКМ. Установлено, что введение УВИС-АК-П до 3 мас. % приводит к повышению деформационно-прочностных характеристик при использовании простого смешения компонентов в лопастном смесителе, а увеличение концентрации наполнителя до 5 мас. % способствует повышению износостойкости ПКМ. Использование технологии совместной активации компонентов при скорости вращения 200–300 об./мин приводит к снижению деформационно-прочностных характеристик, повышению прочности при сжатии 40–60 % и повышению износостойкости ПКМ в 350–1250 раз по сравнению с исходным полимером. Увеличение скорости активации до 400 об./мин приводит к повышению износостойкости до 2025 раз, при этом значение деформационно-прочностных характеристик остается на уровне исходного полимера или даже немного превосходит их. Этот же композит показывает наиболее высокие значения прочности при сжатии, что связано с формированием более жесткоцепной структуры с повышенной сопротивляемостью материала при действии на них внешней нагрузки.

Литература

1. Логинов Б. А. Удивительный мир фторполимеров. – М. : Девятый элемент, 2007. – 128 с.
2. Трение и износ материалов на основе полимеров / В. А. Белый, А. И. Свириденко, М. И. Петроковец, В. Г. Савкин. – Минск : Наука и техника, 1976. – 423 с.
3. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин, Ю. А. Горбаткина, В. К. Крыжановский, А. М. Куперман, И. Д. Симонов–Емельянов, В. И. Халнулин, В. А. Бунаков / под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.

ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ZrO_2 ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОДСЛОЯ NiAl

Мартынов С.А., Русяев А.Н., Кастеров А.М.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4 г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: martynov@ispms.tsc.ru*

Нанесение промежуточного связующего слоя между внешним керамическим покрытием и металлической подложкой является неотъемлемой частью процесса создания термобарьерных покрытий на рабочей поверхности лопаток газотурбинных двигателей. Связующий слой должен обеспечивать хорошую адгезию, то есть прочную физическую и химическую связь между керамическим покрытием и подложкой, а также обладать высокой жаростойкостью, то есть защищать металлическую подложку от окисления и коррозии при высоких температурах. Целью данной работы является поиск возможности увеличения термостабильности и трещиностойкости керамических покрытий ZrO_2 , нанесенных на подложки из титанового сплава ВТ6, путем подбора оптимального процентного содержания компонентов связующего слоя NiAl.

В результате проведенных исследований разработана технология нанесения промежуточных слоев NiAl с различным содержанием Al. Керамические покрытия ZrO_2 и связующий слой NiAl наносили путем электронно-лучевого испарения соответствующих порошков на установке 6Е400. Содержание алюминия в связующем слое составляло 15, 25 и 40 %. Перед испарением покрытия и связующего слоя подложки из сплава ВТ6 нагревали путем сканирования их поверхности расфокусированным электронным лучом. Термостойкость покрытий, нанесенных на исходную подложку из ВТ6 и на промежуточные слои NiAl, исследовали путем испытаний на термоциклирование, а также путем длительного термического отжига. Термоциклирование образцов с покрытием проводили путем их нагрева в муфельной печи до 900 °С, выдержки при данной температуре в течение 1 мин и охлаждения на воздухе, либо посредством погружения в воду комнатной температуры. Длительный отжиг осуществляли при температуре 900 °С, с выдержкой 30/60 мин и охлаждением на воздухе.

Методами растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа изучено влияние температуры подложки на структуру и фазовый состав промежуточного слоя NiAl и керамического покрытия ZrO_2 . Показано, что нанесение промежуточных слоев NiAl подавляет растрескивание и скалывание керамических покрытий ZrO_2 в процессе термического нагружения. На основе полученных результатов выбран оптимальный состав связующего слоя, обеспечивающий максимальное увеличение термической стойкости керамических покрытий ZrO_2 .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00569.

MODIFICATION OF THE SURFACE OF TITANIUM ALLOYS BY THERMAL OXIDATION

Golubev V.I.¹, Medison V.V.^{1,2}, Pegashkin V.F.^{1,b}

¹*B.N. Yeltsin Ural Federal University, 19, Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation,*

²*Public Stock Company VSMPO-AVISMA Corporation,
1, Parkovaya St., Verkhnyaya Salda, Sverdlovsk Obl., 624760, Russian Federation,
e-mail: medisonw@gmail.com, pvf-ustu@hotmail.com*

Thermal oxidation of titanium alloys is a well-known method for changing their surface properties. The application of this method allows one to produce an oxide layer characterized by high hardness, corrosion and wear resistance. It is known that thermal oxidation increases surface electrical resistance of titanium alloys; however, the information about the chemical and phase composition of the oxide layer, electrical resistance of the different grades of titanium alloys is not widely presented in the literature.

The purpose of the paper is to study the electrical resistance of thermally oxidized titanium alloys, the microstructure of the surface layer, the phase and chemical composition of the oxide films. A possible application of thermally oxidized titanium alloys is described in the presented article.

Samples of different grades of titanium alloys sized 40×20×5 mm were studied. The samples were subjected to thermal oxidation in an electrical furnace at temperatures of 650, 700, 750, 800, and 850 °C within 8, 7, 6, 5, and 4 hours respectively.

The electrical resistance of the surface was measured using a Sonel MIC-1000 ohmmeter at a direct current voltage of 50 V. The microstructure of the samples after polishing and etching with a solution of 50 % HF + 50 % glycerol was examined using an Olympus GX51 optical microscope equipped with the *Siams 700* system. Micro X-ray spectral analysis was carried out using a Jeol JSM 6490LV scanning electron microscope equipped with an Inca DryCool energy dispersive detector for micro X-ray spectral analysis with a resolution of 130eV. X-ray phase analysis was carried out using a Bruker D8 Advance diffractometer. The hardness of the samples was measured with a Brinell TB5004 hardness testing unit.

The following results have been demonstrated.

1. Thermal oxidation increases the electrical resistance to 1 TΩ.
2. Electrical resistance decreases with an aluminum content 2 to 4 % in the titanium alloy and increases when the amount of aluminum exceeds 4 %.
3. Vanadium in the titanium alloy decreases electrical resistance due to the volatility of V₂O₅ under heating.
4. The microstructural analysis has shown that the depth of the oxide layer after thermal oxidation ranges between 25 and 100 μm. The oxide layer consists of several regions, different in the chemical composition, situated one over another, this being confirmed by the microprobe analysis.
5. The study of the chemical composition of the oxide layer by X-ray phase analysis has shown that oxide layer consists mainly of rutile (TiO₂), corundum (Al₂O₃) and transitional titanium oxides (Ti₆O, TiO).

It is necessary to focus on the possible applications of the results. One of the applications of oxidized titanium alloys is production of semiconductor devices, when an oxide film is created on the metal surface and a silicide layer is applied on the oxide layer by means of heat treatment.

Another interesting application of the discussed phenomenon is the use of thermally oxidized parts made from titanium alloys for electrical insulation of cutting tools. It increases tool life by a factor of up to 2.5.

ДИФфуЗИОННОЕ БОРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ТРЕНИЯ

Мигаль Ю.Ф., Колесников В.И.

*Ростовский государственный университет путей сообщения,
д. 2, пл. Народного Ополчения, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация,
e-mail: ymigal@mail.ru*

Метод борирования, изобретенный Чижевским [1], является одним из способов химико-термической обработки металлов, в результате которой изменяются структура и химический состав поверхности. Очевидно, с помощью такой обработки можно управлять свойствами материалов. К сожалению, в случае стали метод ХТО-борирования, наряду с положительным эффектом (повышением износостойкости), имеет недостаток – поверхность становится более хрупкой. Этот факт не позволяет использовать данный метод для подготовки образцов, подвергаемых быстропеременным механическим нагрузкам.

Причина повышения хрупкости связана с образованием на поверхности стали боридов железа FeB и Fe₂B. Эти соединения возникают при температурах $t > 800^{\circ}\text{C}$ и длительности порядка 4 ч, характерных для ХТО.

Цель нашего исследования состоит в разработке способа борирования, в котором подобные соединения не возникают. Один из возможных вариантов основан на использовании процесса трения.

Результаты

Ранее нами изучался химический состав поверхностного слоя железнодорожного колеса после длительного пробега [2]. Существенное влияние на этот слой оказало его взаимодействие с полимерной тормозной колодкой. В нем были обнаружены элементы, которые отсутствовали изначально в материале колеса, но присутствовали в материале тормозной колодки. Эти элементы перешли в колесо в результате диффузии, стимулированной скачками давления и температуры в моменты торможения колеса.

Подобное взаимодействие любого стального образца с колодкой, содержащей в своем составе бор, может привести к диффузии бора в поверхностный слой образца без образования боридов железа. В материал тела, имитирующего колодку, следует ввести бор и затем осуществить тормозной контакт колодки со стальной поверхностью. Длительность этого контакта, давление и температуру при контакте можно регулировать и, в конечном счете, можно добиться перехода атомов бора на границы зерен в стальном образце. Использование третьего тела (тормозной колодки) может быть более выгодной процедурой вместо прямого введения бора в поверхностные слои стали, поскольку ввести бор в тормозную колодку существенно легче, чем непосредственно в холодную сталь.

Важным является вопрос о типе борсодержащих соединений, входящих в состав колодки. Обязательным условием диффузии какого-либо элемента в твердую поверхность является его предварительная атомизация. Даже в мелкодисперсном состоянии чистый бор будет существовать в виде микрокристаллитов из-за прочной связи В-В. При прижатии колодки к поверхности стали микрокристаллиты бора будут действовать как абразив.

Выводы

Из вышесказанного следует, что бор в колодке должен присутствовать не в виде микрогранул, а в составе соединения, в котором отдельные атомы бора слабо связаны с соседними атомами других элементов. В этом случае интенсивное тепловое и механическое воздействие при контакте колодки со стальным образцом будет разрушать межатомные связи, и создавать условия для атомизации бора. А затем втирающее и вдавливающее действие колодки будет способствовать проникновению атомов бора через поверхностные барьеры вглубь стального образца. В настоящее время проводятся испытания такого механизма борирования.

Литература

1. Чижевский Н.П. Цементация железа бором // Журнал русского металлургического общества. 1915. Т.4, ч. 19. С. 645–647.
2. Колесников В.И., Козаков А.Т., Мигаль Ю.Ф. Исследование процессов трения и изнашивания в системе колесо-рельс с помощью методов рентгеноэлектронной, оже-электронной спектроскопии и квантовой химии // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 1. – С. 24–37.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ КЕРАМИКИ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ПОРИСТОСТЬЮ НА МЕЗОУРОВНЕ

Микушина В.А.¹, Смолин И.Ю.^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: mikushina_93@mail.ru

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, Академический пр., Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: smolin@ispms.ru

Цель работы – разработка подходов к описанию особенностей разрушения керамики с иерархической пористостью. На основе данных, приведенных в статье [1], были составлены геометрические модели структуры пористых мезообъемов, соответствующих порам верхнего масштабного уровня. Используя эти структурные геометрические модели, исследовали особенности деформации и разрушения пористой керамики на мезоуровне в условиях одноосного сжатия. В этих моделях явно учтены крупные поры размером порядка 100 мкм, а поры мелкого масштаба учтены неявно – через эффективные механические свойства каркаса. Моделирование проводили с использованием конечно-разностного метода, описанного в работе [2]. Для описания механического отклика пористых керамических материалов использована математическая модель упруго-хрупко-пластической повреждаемой среды [3].

В результате проведенных расчетов было выполнено численное моделирование механического поведения мезообъемов керамики на основе Al_2O_3 с бимодальным распределением пор. Также было проанализировано влияние на получаемые картины разрушения и деформационный макроскопический отклик разных критериев разрушения, использованных в расчетах. В работе были рассмотрены четыре критерия, основанные на предельных значениях накопленных неупругих деформаций, главных растягивающих напряжений, поврежденности без учета вида напряженного состояния и поврежденности с учетом вида напряженного состояния (параметра Лоде–Надаи) [4].

При проведении расчетов деформации мезообъемов керамики с иерархической пористостью разрушение зарождается в области наиболее сильной концентрации напряжений, обусловленной структурой порового пространства, и распространяется через поперечное сечение мезообъема. В зависимости от выбранного критерия разрушения меняется толщина областей разрушения и вид усредненной диаграммы нагружения. Картины разрушения при использовании различных критериев качественно схожи. Максимальная область разрушения отмечается для деформационного критерия, а наиболее узкие области разрушения – для критерия по поврежденности. При использовании критерия поврежденности с учетом вида напряженного состояния в материале наблюдаются вертикальные области разрушения, характерные для хрупких материалов.

Эксперименты, представленные в работе [1], показывают, что вид диаграмм деформирования зависит от уровня пористости образцов. Для образцов с небольшим значением пористости он имеет резкий спад напряжений и соответствует хрупкому поведению, а для образцов с большой пористостью – имеет большое количество мелких срывов напряжений и соответствует вязкому поведению. Можно сделать вывод, что для образцов с большой пористостью на микроуровне рекомендуется использовать критерий разрушения по поврежденности, а при небольших значениях пористости на микроуровне – критерий по накопленным неупругим деформациям.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., направление III.23 и при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Литература

1. Неупругое поведение при сжатии керамики с иерархической поровой структурой / М. В. Григорьев, Н. Л. Савченко, С. П. Буякова, С. Н. Кульков // Письма в ЖТФ. – 2017. – Т. 43, вып. 15. – С. 79–86.
2. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / пер. с англ.; под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. – М. : Мир, 1967. – С. 212–263.
3. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / П. В. Макаров, И. Ю. Смолин, Ю. П. Стефанов, П. В. Кузнецов, А. А. Трубицын, Н. В. Трубицына, С. П. Ворошилов, Я. С. Ворошилов. – Новосибирск : Академич. изд-во «Гео», 2007. – 235 с.
4. Еремин М. О. Применение метода механической аналогии для численного моделирования разрушения керамических композитов $ZrO_2-Al_2O_3$ в трехмерной постановке // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 105–112.

ВЕГЕТАТИВНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ПЕЙСМЕКЕРНОЙ АКТИВНОСТИ СИНОАТРИАЛЬНОГО УЗЛА ПРИ ХОБЛ В ПЕРИОДЫ ОБОСТРЕНИЯ И РЕМИССИИ

Миронова Т.Ф., Миронов В.А., Андреев А.Н., Милащенко А.И., Акимова А.В.

*ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России, РФ, г. Екатеринбург,
ул. Репина, 3, Российская Федерация,
e-mail: micor_mail@mail.ru*

Функциональная оценка состояния дыхательной и сердечно-сосудистой систем у больных с ХОБЛ необходимы для ранней и более объективной диагностики состояния пациента на стадии обратимости бронхиальной обструкции. Ранние изменения кардиоваскулярной системы опосредуются через дизрегуляторные нарушения в сократительной деятельности сердца и соответственно тесно взаимосвязаны с вегетативной регуляцией при бронхолегочной патологии. Оценка состояния вегетативной нервной системы (ВНС), способной быстро изменять функции соматических органов, важна при различных заболеваниях, поскольку ВНС вовлекается в патологический процесс на самых ранних стадиях. Важным инструментом оценки дисфункции ВНС является анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР). Оценка вариабельности сердечного ритма в нашем исследовании была проведена с помощью метода высокоразрешающей ритмокардиографии (РКГ).

Цель исследования – оценить динамику состояния вегетативной регуляции у пациентов с ХОБЛ в периоды обострения и ремиссии.

Материалы и методы исследования

В исследование были включены 50 пациентов мужского пола 45–74 лет с ХОБЛ. Диагноз был верифицирован на основе тщательного сбора жалоб больного, анализа анамнеза жизни и заболевания, результатов объективного исследования, а также результатов лабораторно-инструментальных исследований (спирометрии, бронходилатационного теста, пикфлоуметрии, рентгенографии, компьютерной томографии). Мы исключали пациентов с тяжелыми соматическими заболеваниями, способными исказить РКГ-данные (перенесенный ранее инфаркт миокарда, артериальная гипертензия любой степени, стенокардия напряжения высоких функциональных классов и др.), а также в случае сочетания ХОБЛ и бронхиальной астмы. В дополнение к стандартным методам диагностики пациентам было проведено исследование вариабельности ритма сердца с помощью аппаратно-программного комплекса КАП-РК-02-«МИКОР» в покое и при разнонаправленных вегетативных стимулах. Регистрация ритмокардиограмм всем пациентам была проведена в период обострения (1–2 дня после поступления в стационар) и в период стабилизации состояния (перед выпиской).

Результаты

При ХОБЛ наблюдается изменение соотношения факторов, влияющих на пейсмекерную активность синоатриального узла. Значительно снижен вклад парасимпатического влияния, который в норме является преобладающим. Гуморально-метаболические волны являются преобладающим фактором, воздействующим на синоатриальный узел. В период ремиссии было выявлено достоверное улучшение показателей ВСР: уменьшение ЧСС (величина RR достоверно снижается, $p = 0,038$), повышение вариабельности ритма сердца (SDNN увеличивается, $p = 0,013$). Достоверно увеличивался показатель σ_s , отражающий среднее квадратичное отклонение для парасимпатических волн, а также уменьшался показатель σ_l (среднее квадратичное отклонение для гуморально-метаболических волн). Следует отметить, что и в период обострения, и в период ремиссии у пациентов регистрируются очень низкочастотные волны с девиацией вверх от основных волн ритмокардиограммы. Волны связаны с бронхообструк-

цией, данные коррелируют с показателями спирометрии. Значимые изменения наблюдались при проведении проб с разнонаправленными вегетативными стимулами. В период ремиссии улучшается ответ пациента на вегетативные стимулы, повышается общая вариабельность ритма сердца (SDNN). Обращает на себя внимание преобладание гуморально-метаболической регуляции пейсмекерной активности синоатриального узла как в период обострения, так и в период ремиссии.

Выводы

В период обострения у пациентов с ХОБЛ регистрируется значительное снижение регуляторных возможностей активности синоатриального узла, что обусловлено переходом на более низкий уровень состояния регуляции ритма. Уменьшение ЧСС и повышение общей вариабельности ритма при ХОБЛ в период ремиссии отражает повышение функциональных возможностей сердечно-сосудистой системы, данные коррелируют с улучшением показателей функции внешнего дыхания.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОЛАМИНАТОВ

Минаков А.А.¹, Плохих А.И.¹, Шмидт А.², Вальтер Ф.²

¹Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана (Национальный Исследовательский Университет); (МГТУ им. Н.Э. Баумана) д. 5 стр. 1, ул. 2-я Бауманская, г. Москва, 105005, Российская Федерация, e-mail: plokhikh@bmstu.ru

²Institute for Design and Materials Testing (IKW) Department for Materials Test Engineering (WPT) TU Dortmund University, e-mail: frank.walther@tu-dortmund.de

Одним из решений в создании материалов с регулируемой иерархической структурой является реализация схемы горячей пакетной прокатки композитных заготовок, созданных на основе сталей [1, 2]. Применение разработанной экспериментальной технологии позволяет производить заготовки полосового сортамента шириной 100 мм и толщиной от 2 до 10 мм. Микроструктура многослойного металлического материала (МММ) характеризуется параллельным расположением слоев, которые разделены между собой большими угловыми границами. Повторение технологических циклов изготовления позволяет получать МММ с суммарным количеством слоев от 100 до 2000 и толщинами от 100 до 0,8 мкм.

Проведенные исследования показали, что стальные МММ обладают высокими характеристиками усталости в малоцикловом диапазоне. Так образцы, полученные на основе двух нержавеющих сталей типа 08X18H10 и 08X18, изготовленные из полосы толщиной 2 мм с количеством слоев 1400, выдерживают более чем в 3 раза больше циклов до разрушения, чем образцы, состоящие из 100 слоев. Ранее было установлено, что характеристики пластичности (δ , %) МММ имеют тенденцию к весьма заметному снижению, причем к тем большему, чем больше число слоев присутствует в материале. Этот факт нами был связан с механизмом образования «внутренних шеек» в каждом слое, в соответствии с которым «макро» пластичность МММ определяется «микро» пластичностью отдельных слоев. Однако, учитывая одинаковую схему приложения осевой нагрузки, как при проведенном усталостном испытании, так и при одноосном статическом растяжении, неясным остается механизм, который обеспечивает более высокую циклическую долговечность материалов с толщинами слоев 1,0–1,5 мкм.

Исследования усталостных характеристик, осуществленные на образцах наноламинатов композиций Cu/Au и Cu/Nb показали, что уменьшение толщины слоя в многослойном материале вызывает существенное повышение усталостной прочности. При этом методы просвечивающей электронной микроскопии не обнаруживают характерных полос скольжения или дислокационных ячеек вблизи поверхности разрушения [3]. Это показывает, что существующие дислокационные механизмы накопления повреждаемости не могут быть применены для описания усталостного разрушения таких материалов.

Учитывая вышесказанное, можно предположить, что принципиальное отличие в усталостном поведении МММ и массивных поликристаллических материалов, состоит в реализации разных механизмов накопления повреждаемости, если точнее, – в способности МММ не накапливать дефектность в кристаллической решетке слоев, а переводить ее в межслойное пространство, учитывая малую длину свободного пробега дислокаций в слоях субмикро- и нанометрической толщины.

Литература

1. Колесников А.Г., Плохих А.И. Конструкционные металлические материалы с субмикро- и наноразмерной структурой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – Специальный выпуск «Наноинженерия». – С. 44–52.
2. Табатчикова Т.И., Плохих А.И., Яковлев И.Л., Ключева С.Ю. Структура и свойства многослойного материала на основе сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки // ФММ. 2013. – Т.114. – № 7. – С. 633 – 646.
3. Wang, Y.C.; Misra A.; Hoagland R.G.: Fatigue properties of nanoscale Cu/Nb multilayers. Scripta Mater. 54 (2006), 1593–1598.

МЕТОД ОЦЕНКИ НАВОДОРОЖИВАНИЯ ОБОЛОЧКИ С ПЕРЕМЕННЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Емельянов И.Г., Миронов В.И.

ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

Тонкостенные элементы конструкций, представляющие собой оболочки вращения, широко применяются в качестве конструктивных элементов в химическом машиностроении, в трубопроводном транспорте и других отраслях техники. Часто эти конструктивные элементы при эксплуатации находятся под действием внешних механических нагрузок, нагрева и контактируют с агрессивными средами, что приводит к изменению механических свойств материала, снижению их прочности и долговечности. Поэтому при определении напряженного состояния таких конструктивных элементов необходимо учитывать изменение их физико-механических параметров.

В работе предложен метод оценки наводороживания тонкостенной стальной конструкции в процессе ее эксплуатации в водосодержащей среде при повышенной температуре T и избыточном давлении p . Предполагается, что конструкция представляет собой оболочку вращения с переменными геометрическими и физико-механическими параметрами вдоль образующей. Одна из поверхностей оболочки длительное время соприкасается с агрессивной водосодержащей средой, из которой в материал диффундирует водород. Решение данной связанной термодиффузионной задачи может быть получено только численно.

Порядок решения общей связанной задачи можно представить в виде решения задачи теплопроводности с определением распределения температуры $T(t)$ в оболочке во времени и решения задачи диффузии водорода с определением распределения концентрации водорода $c(t)$ в оболочке.

Влияние окружающей среды на поверхность оболочки в каждый момент времени нужно задать граничными условиями. В зависимости от постановки задачи теплопроводности обычно используют три рода граничных условий. Первый род заключается в том, что в каждый момент времени на поверхности оболочки необходимо задать распределение температуры. Второй род основывается на том, что задается тепловой поток через поверхность тела. Для третьего рода задаются температура окружающей среды T^c и закон теплообмена между поверхностью тела и средой. Например, можно задать закон конвективного теплообмена. В работе использован подход, основанный на том, что уравнение теплопроводности заменяется эквивалентным вариационным уравнением, которое решается методом конечных элементов. Вычислительная программа тестировалась на задачах с известными точными решениями.

Процесс диффузионного перемещения водорода описывается диффузионными уравнениями Фика. Известно, что уравнение диффузии полностью идентично уравнению теплопроводности. Поэтому, методы решения задач диффузии и теплопроводности одинаковы. В работе показано влияние граничных условий для задачи диффузии на наводороживание оболочки.

Граничными условиями в рассматриваемой задаче могут служить значения концентрации c , которые должны быть известны в некоторых точках оболочки из физических соображений. Решить эту нестационарную связанную задачу в трехмерной постановке достаточно сложно. Однако, учитывая конструктивные особенности конкретной прикладной задачи, решение можно представить как ряд полусвязных задач.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИОННОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ КРАНА

Миронов В.И.^{1,2}, Огорелков Д.А.², Яковлев В.В.²

¹Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация,

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

В эксплуатации грузоподъемные машины подвержены действию широкого спектра нагрузок нерегулярного характера. В этом случае для расчета долговечности несущей металлической конструкции повсеместно используется гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений в изначальном или скорректированном виде. Данная гипотеза формального нефизического характера часто дает неприемлемый для практики прогноз долговечности. Предлагается использовать для этой цели модель циклической деградации материала, основанную на опытной кинетической кривой. Переход с одного уровня напряжений цикла на другой связывается с переходом с одной кинетической кривой на другую. В силовом подходе равенство текущего значения сопротивлений при разной истории нагружения принимается в качестве условия эквивалентности циклических состояний материала. Цель работы заключается в проведении численного эксперимента для сравнения прогноза ресурса балки по линейной гипотезе и по модели циклической деградации.

Модель циклической деградации материала апробирована в расчетах металлических конструкций ряда машин при блочном нагружении. Расчетная долговечность изделий оказалась ближе к данным эксплуатации, чем при линейном суммировании повреждений. В докладе рассматривается способ расчета долговечности при квазислучайном спектре напряжений в опасной точке конструкции и экспоненциальном законе свободных затухающих колебаний металлоконструкции при заданном логарифмическом декременте.

Объектом исследования выбрана пролетная балка грейферного крана, спроектированного по существующим нормам расчета на прочность и жесткость. Логарифмический декремент затухания колебаний таких конструкций по литературным данным составляет порядка 0,05-0,1. Расчетный декремент колебаний балки с наполнителем из пеноматериала с высоким коэффициентом поглощения энергии оказался значительно выше. На основе преобразованного выражения для кинетической кривой, аппроксимированной показательной функцией, разработан алгоритм расчета долговечности пролетной балки. Сформирована рабочая программа на языке Python. Материалы различаются показателем степени кинетической кривой, который выбран в качестве параметра. Результаты расчета представлены в виде набора графиков, отражающих циклическую поврежденность материала в опасной точке конструкции. Выявлено существенное влияние на долговечность уровня демпфирования, а расчет по предлагаемой методике дает консервативный прогноз долговечности балки по сравнению с линейным суммированием.

Работа выполнена в рамках государственного задания, тема № 0391-2016-0001.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕКСТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПАРАМЕТРАХ ОСЬ–УГОЛ

Берестова С.А., Копытов Н.П., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: s.a.berestova@urfu.ru, nikitako@mail.ru, n_misura@mail.ru, mityushov-e@mail.ru*

Для моделирования случайных вращений в задачах количественного описания кристаллографической текстуры, т. е. преимущественной ориентации кристаллографических осей поликристаллических материалов, традиционно используют функцию распределения ориентаций кристаллографических осей, записаную с помощью матриц направляющих косинусов, индексов Миллера, углов Эйлера–Крылова. В последнее время для описания кристаллографической текстуры все чаще используют кватернионы, параметры Родрига и векторное пространство параметров ось–угол. Для анализа текстуры, являющейся основным фактором, влияющим на анизотропию поликристаллического материала, в пространстве углов Эйлера–Крылова необходимо наличие некоторого множества сечений этого пространства. В итоге появляется возможность получить распределение подвижных осей во всем пространстве углов Эйлера–Крылова, но нет возможности получить количественную характеристику распределения этих осей в его ограниченном объеме. Наглядно представить компоненты текстуры и их объемную долю не позволяют ни индексы Миллера, ни кватернионы. Для визуализации кристаллографических направлений и их преимущественной ориентации в поликристаллическом материале в работе дается представление текстуры в параметрах ось–угол. Рассматриваются поликристаллы орторомбической симметрии с кубической симметрией решетки.

Параметры ось–угол позволяют описать всевозможные вращения на группе $SO(3)$, отражающие всевозможные кристаллографические направления кристаллов. Группа $SO(3)$ представлена как совокупность поворотов на всевозможные углы вокруг всевозможных осей, заданных всеми векторами единичной сферы. Совокупность таких вращений можно описать как шар радиуса π в трехмерном евклидовом пространстве. При этом на границе шара отождествляются противоположные точки для предотвращения совпадающих вращений.

Наглядно представлено равномерное распределение кристаллографических подвижных осей внутри ограниченного пространства, характеризующегося областью ориентаций, ограниченной некоторым радиусом. Данному распределению в трехмерном евклидовом пространстве соответствует однородный шар выбранного радиуса. Построены также «облака точек», соответствующих кристаллографическим направлениям, в шаре радиуса π при изменении плотности их распределения по нормальному закону по мере удаления от центра. Рассмотрены распределения кристаллографических осей, соответствующие как изотропному, так и анизотропному состоянию поликристаллического материала, что наглядно отражается формой «облака».

ОБЛАСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕКСТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОРТОТРОПНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ С КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ РЕШЕТКИ

Берестова С.А., Копытов Н.П., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: s.a.berestova@urfu.ru, nikitako@mail.ru, n_misura@mail.ru, mityushov-e@mail.ru*

Область изменения текстурных параметров (интегральных характеристик преимущественной ориентации кристаллографических осей) позволяет решать задачи управления анизотропией свойств, показывая всевозможные текстурные состояния ортотропного поликристаллического материала с кубической симметрией решетки. Каждой точке этой области соответствует определенная кристаллографическая текстура, определяющая анизотропию как упругих, так и пластических свойств.

Область может быть получена как аналитическим методом, так и численным экспериментом статистического моделирования. В работе проводится сравнение полученных и тем и другим методами областей.

Аналитическое решение задачи получено путем использования решения задачи об определении эффективных (средних степенных взвешенных) собственных значений оператора упругости текстурированного анизотропного поликристаллического материала с кубической симметрией решетки. Условие положительности весовых коэффициентов позволяет записать 4 неравенства, задающих область изменения текстурных параметров. В силу инвариантности данных неравенств к циклической перестановке индексов означает существование оси симметрии третьего порядка, одинаково наклоненную к координатным осям. Одно из неравенств дает границу в виде конической поверхности, три других – ограничивающие плоскости. Алгоритм визуализации формообразующих элементов области подразумевает получение линий пересечения плоскостей с конической поверхностью.

Численное решение опирается на определение текстурных параметров, т. е. изначально утверждается, что область ограничена и лежит в первом октанте. Задача построения области решена нахождением текстурных параметров методом Монте-Карло по плотности распределения кристаллографических осей в пространстве. При моделировании области используются октеты – симметричные отображения случайным образом взятых ориентировок во все октанты пространства. Генерируя множество октетов случайно взятых ориентировок, вычислены соответствующие им текстурные параметры, т. е. точки области.

Области визуально схожи, они обладают необходимой симметрией. Геометрические центры полученного численным методом облака текстурных состояний и аналитически построенной области совпадают с точкой, соответствующей нетекстурированному состоянию. Эволюция текстуры на различных стадиях термомеханической обработки может быть геометрически представлена траекторией текстурных состояний, лежащих в области изменения текстурных параметров. Траектория текстурных состояний, построенная по результатам независимого эксперимента с алюминиевым сплавом в 5-клетевом стане непрерывной прокатки, принадлежит области изменения текстурных параметров.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Мичуров Н.С.¹, Пугачева Н.Б.¹, Веретенникова И.А.¹,
Халевицкий Ю.В.¹, Смирнова Е.О.¹, Игумнов А.С.²

¹Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: n.michurov@gmail.com

²Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

Проблема соединения таких разнородных материалов, как стали и сплавы титана сваркой связана с существенным различием теплофизических свойств, образованием трещин в зонах термического влияния и образованием охрупчающих неразъемное соединение интерметаллидных соединений. Имеющийся в настоящее время опыт использования переходных вставок и лазерного излучения позволяет получать плавный переход между свариваемыми материалами при расплавлении при малых размерах сварного шва. Актуальным является определение прочности и изучение поведения данных сварных соединений при нагружении. Цель работы – разработка конечно элементной модели сварного соединения титанового сплава ВТ1-0 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т с промежуточной медной вставкой, полученного с помощью СО₂-лазера и оценка поведения шва с учетом реально имеющих место микронеоднородностей соединения при упругопластической деформации.

В работе проводилось исследование сварного соединения листов толщиной 3 мм из стали 12Х18Н10Т и сплава ВТ1-0, полученного углекислотным лазером¹ с переходной вставкой из меди М1 толщиной 1 мм. Геометрическое представление сварного шва получили обработкой изображения, полученного с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA II XMU. Диаграммы деформационного упрочнения зон сварного соединения определяли при помощи оригинальной методики, основанной на результатах анализа испытаний по индентированию и царапанию индентором Берковича, проведенных на современном комплексе NanoTriboindenter TI 950². Конечно-элементное моделирование осуществлялось в программе конечно-элементного анализа ANSYS Academic Research v. 16.0. Численные расчеты механического нагружения сварного шва производили на его двухмерной геометрической вычислительной модели в квазистатичной постановке в программном комплексе ANSYS на вычислителе кластерного типа URAN ИММ УрО РАН.

Проведенное моделирование показало, что, как и в случае реальных испытаний, интерметаллиды при пластической деформации в сварном шве демонстрируют высокую прочность и практически не деформируются. В результате жесткие недеформируемые границы интерметаллидов являются причиной возникновения участков локальной пластической деформации. Их степень локализации возрастает по мере увеличения степени деформации, что приводит к усилению неоднородности деформированного состояния на микроуровне. Также было показано, что при растяжении максимальная эквивалентная деформация локализуется между близко расположенными интерметаллидами и формируются зоны концентрации растягивающих напряжений, высокий уровень которых способствует интенсивному пластическому разрыхлению и ускоряет процесс разрушения. Однако данный процесс тормозится за счет большой пластичности твердого раствора на основе меди. Исключение интерметаллидов из модели показало, что происходит более равномерное распределение напряжений в материале сварного шва, а преимущественным местом разрушения сварного шва, также как и в случае с наличием во шве интерметаллидов, является переходная диффузионная зона на границе сварного шва с титановым сплавом, которая несмотря на легирование ее медью и другими элементами малопластична и растрескивается в ходе испытаний на растяжение.

Работа выполнена по государственному заданию тема № 0391-2016-0002 и частичной поддержке гранта РФФИ 16-38-00741 мол_а.

¹ Сварка была выполнена в ИТПМ СО РАН под руководством профессора, д.ф.-м.н. А.М. Оришича.

² Все испытания проведены на оборудовании Центра коллективного пользования ИМАШ УрО РАН.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Мкртычев О.В.

*Филиал ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»
в г. Новороссийске, 75, Мысхаковское шоссе, г. Новороссийск, 353919, Россия,
e-mail: oleg214@ya.ru*

Прочность материалов, подвергающихся различным видам воздействий, является важным критерием, стоящим на пути развития многих областей современной техники. Среди этих материалов часто употребляются в различных отраслях керамические материалы и стекло или соединения на их основе, например в стеклометаллокомпозитных материалах [1]. Такие материалы часто упрочняют путем введения специальных добавок или нанесения на его поверхность тонкопленочных покрытий или их использование для получения таких покрытий [2]. Среди различных видов взаимодействия в последнее время все больший практический и теоретический интерес вызывает разрушение поверхности материалов, подвергающихся воздействию мощного лазерного импульса и/или плазмы, образующейся при этом. Авторы работы рассматривали взаимодействия подобного вида, включая облучение материала, покрытого системой плоскопараллельных тонких пленок [3, 4]. При этом были проведены исследования лучевой прочности стеклянных материалов, покрытых наноразмерными покрытиями из разного количества пленок, полученных из диоксидов кремния и титана методом золь–гель-технологий [5–7]. В результате этих исследований разработана методика прогнозирования динамики лучевой прочности наноразмерных покрытий под действием мощного импульсного излучения.

Литература

1. Соколова Н. М. Возможность энергетического подхода к изучению процессов разрушения металлических стекол // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 1. – С. 6–9.
2. Любимова О. Н., Морковин А. В., Дрюк С. А. Особенности структуры зоны соединения стекла и стали в технологии получения стеклометаллокомпозита // Материаловедение. – 2017. – № 4. – С. 3–7.
3. Шеманин В. Г., Мкртычев О. В. Температурное поле при лазерном абляционном разрушении мишени при малых температурах // Журнал технической физики. – 2018. – Vol. 88 (5). – С. 643–648.
4. Мкртычев О. В. Аналитическое исследование энергетических коэффициентов отражения и преломления света // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2012. – № 4. – С. 36–38.
5. Мкртычев О. В., Шеманин В. Г. Прогнозирование оптической прочности нанокомпозитов // Петербургский журнал электроники. – 2014. – № 3 (80). – С. 13–22.
6. Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. The optical strength of the glass nanocomposites at laser ablation // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653. – No. 1. – P. 012012.
7. Мкртычев О. В., Шеманин В. Г. Лазерное абляционное разрушение нанопленок на поверхности стеклянных образцов // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2015. – № 2. – С. 5–10.

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ЖЕСТКОГО УГЛЕРОДНОГО НАНОСЛОЯ НА ЭЛАСТОМЕРНОЙ ПОДЛОЖКЕ ПОСЛЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Морозов И.А.¹, Каменецких А.С.², Беляев А.Ю.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия, 614013, г. Пермь,
ул. ак. Королева, 1, Российская Федерация,
e-mail: ilya.morozov@gmail.com*

²*Институт электрофизики УрО РАН, Россия,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, Российская Федерация,
e-mail: alx@iep.uran.ru*

Модификация поверхности является перспективным направлением улучшения различных эксплуатационных свойств изделий: жесткости, износостойкости, сопротивления коррозии, антибактериальных характеристик. Многочисленные исследования указывают на положительный эффект от создания на поверхности углеродного (или углеродсодержащего) покрытия. В частности, он заключается в улучшенной адсорбции определенных протеинов, способствующих снижению тромбообразования и повышению совместимости материала с клетками организма. В случае гибких, упругих материалов, работающих под нагрузкой, необходимо учитывать изменение морфологии покрытия под воздействием внешней деформации, возникновение повреждений.

В работе исследовано влияние динамической нагрузки на углеродный нанослой, нанесенный на полиуретановый эластомер магнетронным распылением графитовой мишени в импульсном режиме. В зависимости от времени обработки получены материалы со слоями толщиной от 3 до 90 нм. В результате обработки изменяется энергия поверхности (оказывает влияние на адсорбцию протеинов), рельеф приобретает складчатую структуру (текстура поверхности влияет на адгезию бактерий, размеры которых сопоставимы с особенностями рельефа). Складки связаны с возникновением в приповерхностном слое внутренних напряжений. Фрактальные и волновые параметры поверхности зависят от толщины нанесенного покрытия. В результате циклической динамической нагрузки (амплитуда деформации – 10 %, частота – 1 Гц) текстура поверхности в разгруженном состоянии изменяется. Складки становятся более выраженными, их амплитуды и длины волн увеличиваются. Показана корреляция между изменениями микроструктуры поверхности и толщиной слоя. Отслоения покрытий не происходит, однако при толщинах >30 нм появляются микротрещины. Изменения структуры связаны с неупругими деформациями поверхностного слоя материала, его расщеплением. Изменения, вызванные деформацией, могут оказывать негативный эффект как на функционирование самого материала, так и его взаимодействие с окружающей средой. Возможным направлением улучшения свойств данного класса материалов является переход к созданию несплошных кластерных покрытий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-79-20042.

CHOOSING STONE ROCKS FOR APPLICATION IN NEW GENERATION CONCRETE

Moskvin R. N., Belyakova E. A., Yurova V. S.

*Penza State University of Architecture and Construction
28, Hermana Titova St., Penza, 440028, Russia,
e-mail: var_lena@mail.ru*

In recent decades, modern new generation concrete – High Performance Concrete – has been created in Russia and abroad. It demonstrates high strength characteristics; namely, compressive strength reaches 100–200 MPa, bending reaches 15–25 MPa, depending on the composition. In the case of using fiber and additional technological procedures, compressive strength will reach 250 MPa and, for bending, 35–40 MPa. High bending strength indicates resistance to cracking. Such concrete can be used in areas where crack resistance is one of the most important criteria. Modern concrete has stepped far beyond the boundaries of building materials science and expanded the range of materials used not only in the construction industry, but also in shipbuilding, machine building, machine-tool construction and other areas where it has not been effective to use traditional concrete to this day.

The unique properties described are achieved by an optimally selected granulometric composition of initial components divided into three scale levels. The first one, micrometric, includes cement, stone flour from dense and strong rocks, microsilica. The average level is fractionated quartz sand or sand from dense and strong rocks. The use of rubble (macrolevel), unlike traditional concrete, is optional, but its use reduces not only the consumption of micro- and nanometric components, but also, more important, the shrinkage of concrete.

However, such high strength properties are unattainable without the use of modern plasticizers. It is their application in combination with the finely dispersed components of the first dimensional level (rheological matrix of the first kind) that has made concretes self-compacting, with minimum water consumption and, as a result, low shrinkage and high physical and mechanical properties of finished concrete.

In many respects, the properties of the finished product depend on the properties of the given matrix. For a concrete mix, a rheological matrix of the first kind can be considered a dispersion medium in which larger grains of sand and crushed stone are uniformly placed, without contacting each other. Therefore, the right choice of components (portland cement, stone flour, microsilica, etc.) for the rheological matrix is a key step in obtaining highly effective modern concretes.

The level of influence of finely divided mineral fillers on the properties of concrete depends on their origin, chemical and mineralogical composition, the shape and size of the particles, the quantitative content in the mixture.

We propose several criteria that must be met by fine-grained rocks, which are as follows.

1) They must be dispersed and ground to a microscale level (0 to 120 μm) to form a flowable disperse system.

2) They must be dense to prevent the migration of water and dissolved hyperplasticizer into the pores of the particles.

3) They must have rheological activity comparable to that of cement. The increase in the water requirement of a mixture of cement with a finely divided filler is allowed up to 10-15% in comparison with pure cement. Dispersive filler is unsuitable since, when used, increases water consumption in comparison with cement to 25–28 %.

4) The particles must be positively charged, because all hyperplasticizers are anion-active and have negatively charged functional groups; this promotes the adsorption of hyperplasticity polyions on the particle surface thus increasing the mobility of the mixture. On negative-charged particles, GP ions do not precipitate, their rheological effect being insignificant.

In accordance with the criteria put forward, a number of rock formations were analyzed: dense dolomite and calcite limestones, granite, basalt, sandstone, porous limestone and diatomite.

It is shown that the most suitable rocks are dense rocks of both volcanic and sedimentary origin.

THE STRUCTURE OF SnO₂-Ag COATING FORMED ON COPPER BY ELECTROEXPLOSION

Moskovsky S.V., Romanov D.A., Gromov V.E., Filyakov A.D.,
Ysova A.V., Boykova A.V.

*Siberian State Industrial University, 42, Kirova St., Novokuznetsk, 654007, Russia,
e-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru*

By evidence derived from the Interelectromash International Association, the segment of failures in the work of electrical equipment caused by contact pair failure ranks first among the other troubles, and it amounts to 26 %. To reestablish the work, the contact is replaced by a new one. The combination of various and simultaneously incompatible requirements is typical of electric contact materials. For example, they need to have high hardness, melting temperature, electric and heat conductivity, electrocorrosion and corrosion resistance combined with the absence of welding and bridge formation. The application of powder metallurgy methods enables one to realize in one material the diverse and contradictory complex of properties that should be possessed by an electrocontact material.

As the process of material failure begins from the surface, for a number of practical applications, for example, the hardening of the contact surfaces of a medium, heavy-duty switches and commutation apparatuses, it is promising to form a protective coating since in this case it is important to have electroerosion resistance only on the contact surface instead of the bulk. It is economical and technically practical to develop an approach to the creation of the materials wherein the mechanical strength of a part is achieved by the use of economic substrates and the special properties of the surface – by the continuous or local formation of a composite coating on it, whose properties correspond to the service requirements. The saving in this approach may reach 90 %. Expert estimates substantiate the tendency. One of the primary lines of research in condensed state physics is the development of methods for increasing the service characteristics of different materials. In this regard, the surface hardening of arc-resistant electric contacts is a topical problem in the development of new advanced technologies.

The phase and elemental compositions of the surface layer of a copper electric contact of a KPV-604 contactor subjected to electroexplosion spraying of the SnO₂-Ag composite system coating were studied by the method of transmission electron microscopy. The scale of the elemental structure of the coating surface varies within a very wide interval after electroexplosion spraying – from hundreds of micrometers to tens of hundreds of nanometers. According to the morphological feature, two layers can be distinguished in the coating volume, namely, the coating proper and a thermal effect layer smoothly transferring to the bulk of the sample. A nanocrystalline structure was detected. The main phases of the coating are SnO₂, Ag₃Sn, Cu₁₀Sn₃, Cu₃Sn, Cu₆Sn₅, Ag₄Sn and CuO. The volume of copper adjacent to the coating has a structure indicative of the high level of deformation of the sample surface layer in the electroexplosion method of coating formation.

This work was supported in part by a grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists having a Candidate of Sciences degree (project no. MK-1118.2017.2) and by the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 16-32-60032 mol_a_dk, 18-32-00075 mol_a).

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СТЕПЕННОЙ МАГНИТОУПРУГОЙ РЕЛАКСАЦИИ СТАЛИ 30X13 ОТ АМПЛИТУДЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР ОТПУСКА

Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Соколов Р.А.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: muratows@mail.ru

В работе [1] описано магнитоупругое размагничивание трех ферромагнитных стальных образцов, изготовленных из одной заготовки. Образцы предварительно намагничивались до насыщения, а затем подвергались серии стоцикловых растягивающих нагрузжений с последующим увеличением амплитудной нагрузки в следующих сериях с повторным предварительным намагничиванием до насыщения. Обнаружено свойство, при котором пиковые значения остаточной намагниченности $H_{p\sigma_{max}}$ и $H_{p\sigma_{min}}$, соответствующие максимальным или минимальным нагрузкам (σ_{max} и σ_{min}), совпадают с номером цикла N согласно степенному закону:

$$H_{p\sigma_{max}} = H_{\sigma_{max}} + \Delta H_{\sigma_{max}} \cdot N^{-\alpha_{\sigma_{max}}};$$

$$H_{p\sigma_{min}} = H_{\sigma_{min}} + \Delta H_{\sigma_{min}} \cdot N^{-\alpha_{\sigma_{min}}}. \quad 1)$$

Здесь: $H_{\sigma_{max}}$, $H_{\sigma_{min}}$, $\Delta H_{\sigma_{max}}$, $\Delta H_{\sigma_{min}}$, $\alpha_{\sigma_{max}}$ и $\alpha_{\sigma_{min}}$ – эмпирические коэффициенты степенной аппроксимации.

В представленной работе показаны результаты аналогичных испытаний, закаленных и отпущенных при различных температурах, образцов стали 30X13. На рис. 1 представлена одна из магнитоупругих циклограмм, где наблюдается закономерность 1.

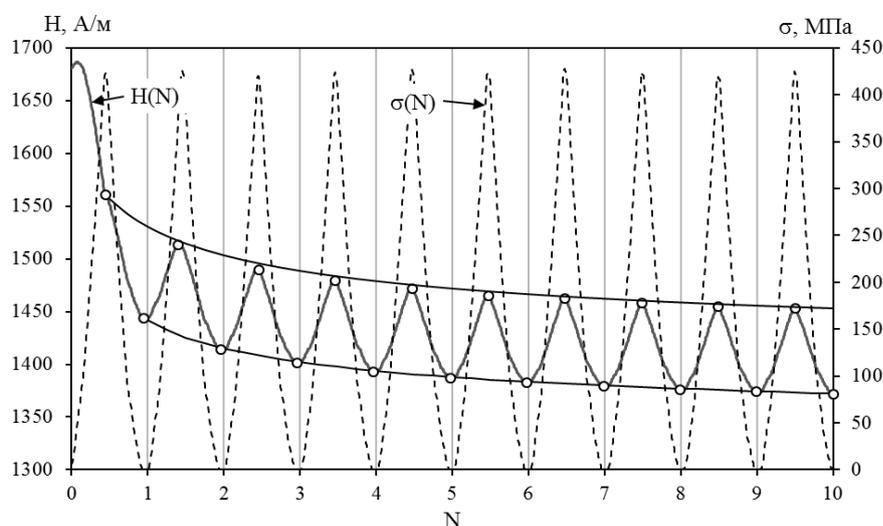


Рис. 1. Магнитоупругая циклограмма закаленного и отпущенного при 400 °С образца при амплитудной нагрузке 420 МПа

Необходимо отметить, что на образцах стали 30X13 наблюдалась более высокая корреляция с зависимостью 1, поскольку коэффициент достоверности аппроксимации R^2 во всех сериях испытаний был не ниже 0,97, а среднее значение составило 0,995.

Коэффициенты аппроксимации $H_{\sigma_{max}}$, $H_{\sigma_{min}}$ отражают устойчивое состояние магнетика с нагрузкой и без нее при $N \rightarrow \infty$. Вполне ожидаемо, что эти коэффициенты связаны с коэрцитивной силой, что иллюстрирует рис. 2.

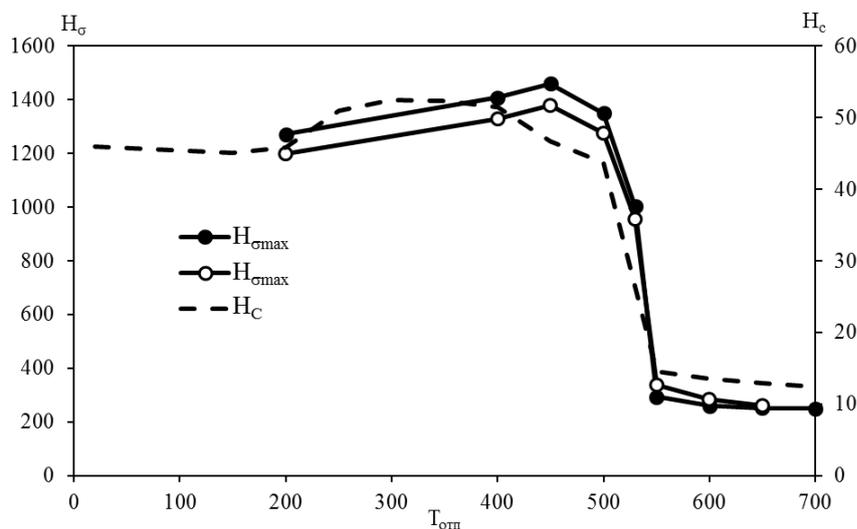


Рис. 2. Зависимость коэффициентов $H_{\sigma_{max}}$, $H_{\sigma_{min}}$ при амплитуде нагружения 400 МПа и коэрцитивной силы H_C [2] от температуры отпуска

В работе [1] было показано, что произведение $\Delta H_{\sigma} \cdot \alpha_{\sigma}$ и величина $\Delta h = \Delta H_{\sigma_{min}} / \Delta H_{\sigma_{max}}$ в некоторой степени отражают характерные для материала значения механических напряжений. В нашем случае можем видеть, что при температурах отпуска 200÷500 °C характер параметра $\Delta H_{\sigma_{min}} \cdot \alpha_{\sigma_{min}}$ практически одинаковый (рис. 3). Затем происходит изменение поведения кривых, что связано с интенсивными структурными изменениями. Возможно, линейное поведение отражает механизмы релаксации при отсутствии микропластических деформаций, а изменение линейного поведения связано с их появлением. На такую мысль наталкивает также характер поведения параметра Δh , который для температур отпуска от 600 °C начинает резко возрастать при значениях нагрузок 650 МПа (600 °C) и 400 МПа (700 °C) (рис. 4). Также можно наблюдать, что и при 550 °C параметр δh имеет тенденцию к росту по сравнению с меньшими температурами.

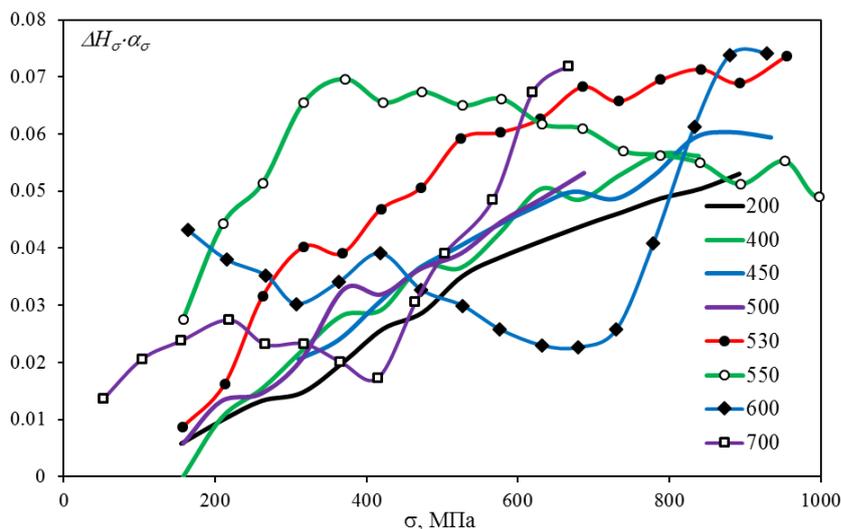


Рис. 3. Зависимость $\Delta H_{\sigma} \cdot \alpha_{\sigma}$ от амплитуды нагружения для различных температур отпуска

В [1] излагается гипотеза о возможности предсказания усталостных характеристик ферромагнитных материалов по поведению их магнитоупругих релаксационных параметров, что требует гораздо меньше времени по сравнению с классическими усталостными испытаниями. Однако к предлагаемой гипотезе следует относиться с осторожностью и ответить на нее утвердительно можно, выполнив дополнительный комплекс исследований. Но мы не

уменьшаем результат и считаем его ценным, поскольку само по себе рассмотренное свойство степенной магнитоупругой релаксации является не изученным и не объясненным.

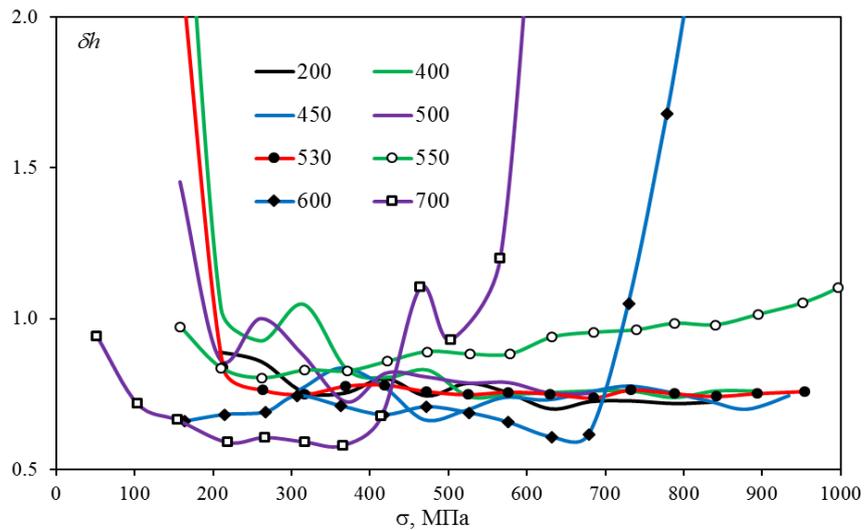


Рис. 4. Зависимость параметра δh от амплитуды нагружения для различных температур отпуска

Литература

1. Магнитоупругое размагничивание стали под действием циклического нагружения / К. Р. Муратов, В. Ф. Новиков, Д. Ф. Нерадовский, Р. Х. Казаков // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119, № 1. – С. 19–25.
2. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Магнитные свойства термообработанных сталей. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ РЕЗИН НА ОСНОВЕ ЭПИХЛОРГИДРИНОВОГО И БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА

Мухин В.В.¹, Петрова Н.Н.², Маскалюнайте О.Е.³

^{1,2}ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»,
д. 48, ул. Кулаковского, 677000, г. Якутск, Российская Федерация,

e-mail: mvynj@yandex.ru, pnn2002@mail.ru

³ИР и РТИ ПАО «Уральский завод РТИ»,

д. 3, ул. Монтерская, г. Екатеринбург, 620085, Российская Федерация,

e-mail: Maskalunaite-OE@uralrti.ru

В качестве основы для создания морозостойких эластомерных материалов уплотнительного назначения чаще всего применяется бутадиен-нитрильный каучук с низким содержанием нитрила акриловой кислоты. В проведенных ранее исследованиях показано, что резины на основе таких каучуков теряют свои эксплуатационные свойства из-за процессов вымывания пластификатора углеводородной средой [1].

Для решения проблемы и надежной эксплуатации резин в углеводородных средах в условиях холодного климата необходим поиск и изучение работоспособности новых каучуков, сочетающих в себе стойкость к воздействию углеводородных рабочих сред и морозостойкость, обусловленную не наличием пластификатора, а гибкостью и подвижностью основной цепи каучука. Перспективной основой для создания уплотнительных деталей являются эпихлоргидриновые каучуки, обладающие превосходными низкотемпературными свойствами и агрессивностойкостью.

Цель работы – изучение климатического старения эластомерных материалов на основе бутадиен-нитрильного и эпихлоргидринового каучуков при натурной экспозиции в условиях совместного воздействия холодного климата и углеводородной среды.

В работе исследовали модельную резину под шифром «Э» на основе эпихлоргидринового каучука Hydrip T6000, который в своем составе содержал кроме прочих ингредиентов 5,5 % мас. пластификатора. Одновременно исследовались резины на основе бутадиен-нитрильных каучуков под шифрами «А», «В», «С»: смесь «А» на основе СКН-26 СНТ с содержанием пластификатора 9,7 %; смесь «В» основе СКН-26 СМНТ с 12,1 % мас. содержанием пластификатора; смесь «С» на основе СКН-26 СНТ и СКН-18 СНТ с 10,4 % мас. содержанием пластификатора.

В качестве параметров, характеризующих эксплуатационные свойства резин выбрали: условную прочность и относительное удлинение по ГОСТ 270-75 [2], остаточную деформацию сжатия (ОДС) при 100 °С в течение 72 ч по ГОСТ 9.029-74 [3], степень набухания по ГОСТ 9.030-74 [4], коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия (K_B) при температурах –30 и –50 °С по ГОСТ 13808-79 [5], содержание пластификатора определяли с помощью метода ИК-спектроскопии.

Изготовленные из перечисленных смесей образцы были помещены в отдельные емкости с нефтью, которые служили средой для климатического старения. Емкости были выдержаны в течение 24 мес в одном из неотапливаемых помещений климатического полигона СВФУ им. М.К. Аммосова (г. Якутск). Каждые два месяца образцы отбирали для проведения испытаний. Климат г. Якутска – резко континентальный, с сочетанием негативных факторов, провоцирующих ускоренное старение эластомерных материалов.

По результатам проведенных исследований было установлено, что у всех резин происходят сезонные колебания показателей прочности, ОДС, относительного удлинения, которые зависят от степени набухания. Происходящие изменения всех исследованных показателей можно объяснить диффузионными процессами, которые происходят при контакте резин с нефтью, – это вымывание пластификатора и проникновение углеводородов.

У резин «А», «В» и «С» степень набухания в течение всего периода исследования имеет отрицательные значения, что говорит о преобладании процессов вымывания из мате-

риала компонентов резины. Резина «Э» имеет положительные значения степени набухания, что обусловлено меньшей стойкостью резины к воздействию нефти.

Коэффициент морозостойкости K_B для резины на основе эпихлоргидринового каучука при $-30\text{ }^\circ\text{C}$ практически постоянен, в то время как у всех резин на основе бутадиен-нитрильного каучука он подвержен значительным сезонным колебаниям. Даже после потери большей части пластификатора показатель K_B при $-50\text{ }^\circ\text{C}$ у резины «Э» имел значения, превосходящие «А», «В» и «С», что говорит о лучшем сохранении низкотемпературных свойств.

Резина на основе эпихлоргидринового каучука может сохранять свою морозостойкость, в отличие от резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков, и может быть рекомендована для использования в качестве материала для создания уплотнительных устройств.

Литература

1. Петрова Н. Н. Принципы создания масло- и морозостойких резин и их реализации для эксплуатации в условиях холодного климата : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2006. – 48 с.
2. ГОСТ 270-75. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении.
3. ГОСТ 9.029-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Резины. Методы испытаний на стойкость к старению под действием статической деформации сжатия.
4. ГОСТ 9.030-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред.
5. ГОСТ 13808-7. Резина. Метод определения морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФЕНИЛОНА С-2

Колесников В.И., Мясников Ф.В., Новиков Е.С., Карпенко К.И.

*Ростовский государственный университет путей сообщения,
д. 2, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения,
Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация,
e-mail: y2k4@mail.ru*

Работа посвящена разработке многофункциональных, универсальных ингибиторов изнашивания трибосистем, которые представляет собой маслonaполненный полимер, обладающий свойством интеллекта, т. е. возможностью динамической корректировки собственных функциональных свойств при трении. Проблема наполнения полимера смазочным материалом (СМ) решается технологически за счет приема предварительной пропитки СМ выбранных нанодисперсных наполнителей.

В качестве полимерной матрицы использован конструкционный полимер фенилона С2, обладающий высокими прочностными характеристиками, в качестве антифрикционных наполнителей – порошок политетрафторэтилена марки Ф4МБ (сополимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом) в количестве 10–20 мас. % и наноразмерные частицы природных соединений класса силикатов, алюминатов (1,5–3 %), что обуславливает формирование на трибоконтате поверхностной наноструктуры, значительно повышающей параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик. Активированные формы минералов, введенные в состав полимерной матрицы композиционного материала, способны обеспечивать поглощение минерального масла в процессе формования, что наряду со структурирующим и армирующим действием в объеме матричного материала придает частицам способность к самосмазыванию при попадании в область трения.

Введение в состав композитов высокоэффективных СМ, обуславливает формирование на трибоконтате поверхностной наноструктуры, значительно повышающей параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик. Получение маслonaполненных нанокомпозитов проводится путем пропитки порошка смазочным материалом ПФМС (полиметилфенилсилоксан), ВГО (вакуумный газоль), и Ц-52 (цилиндровое масло). Выбор СМ обусловлен их способностью сохранять свои трибологические характеристики в высокотемпературных режимах работы.

Пропитка композиции порошка фенилона С2 и политетрафторэтилена Ф4МБ с активированными наполнителями проводилась предварительно разогретым СМ. Маслonaполненная композиция загружалась в пресс-форму, где после предварительной просушки при температуре 120 °С производилось брикетирование при давлении 500 кг/см². Затем осуществлялся разогрев брикета до температуры 310 °С и прессование при давлении 500 кг/см². Полученные таким образом образцы маслonaполненных композитов использовались при проведении трибологических испытаний.

Проведен цикл трибологических испытаний на машине трения типа Амслер ИИ 5018 по схеме «палец–ролик» без подвода внешней смазки (палец изготовлен из композиционного материала). Каждый образец испытывался при разных фиксированных нагрузках. Диапазон прикладываемой нагрузки составлял 209Н–1029Н. В течение всего времени испытаний производилась непрерывная запись момента силы трения на нижнем валу машины. После окончания испытаний определялись величины износа пальца и ролика как разница между весом до и после проведения испытаний.

Результаты трибологических испытаний показали значительное улучшение трибологических характеристик для всех маслonaполненных композиций при практически неизменных прочностных характеристиках.

Для определения величины и знака изменения энтальпии, связанного с химическими реакциями, происходящими в исследуемых композитах под влиянием температуры, а также изменения состояния и превращения фаз, хода изменения веса образца при испытании, про-

водили термогравиметрический (ТГА) и дифференциально-термический (ДТА) анализы с использованием дериватографа STA 449 F3 Jupiter. Испытания проводили в специальных корундовых тиглях на воздухе и в инертной атмосфере азота. Температуры размягчения (плавления, стеклования, термодеструкции) определяли по характерным изгибам дифференциально-термических и термогравиметрических кривых.

Дериватограмма композиционного материала фенилона С2 + 10 % Ф4МБ во всем температурном интервале имеет два эндоэффекта, соответствующих деструкциям материалов, составляющих композицию. В интервале температур 460–480 °С наступает полная деструкция образца. При исследовании маслonaполненных композитов характер дериватограмм практически не изменяется, что свидетельствует о сохранении первоначальной структуры испытуемых материалов.

В результате проведенных исследований разработана новая технология химического конструирования полимерных ингибиторов изнашивания, обладающих свойством самосмазывания и изучены их свойства.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КРИТЕРИЙ ПЕРЕХОДА К ПЛАСТИЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ

Лунев А.Г., Надежкин М.В.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия,
e-mail: myv@ispms.ru*

Производство металлических изделий, основанное на многопроходном пластическом деформировании заготовок, требует постоянного контроля состояния металла. Одним из оперативных методов может быть ультразвуковой контроль. Возможность применения ультразвука для контроля пластически деформированного металла описана в работах Кобаяши, Зуева. Зависимость скорости ультразвуковых волн и их затухания от плотности дислокаций, увеличивающейся при пластической деформации, подробно обсуждается в работах Гранато и Люке и позднее Маурела.

Цель настоящей работы – установление критериев перехода к пластическому деформированию и разрушению в зависимости от скорости поверхностных волн в конструкционных сплавах.

Для исследований были использованы следующие материалы: низкоуглеродистые стали с содержанием углерода 0,1 % и 0,2 % Ст10 и Ст20, сталь 40Х13, сталь 08Х18Н10Т и технически чистый титан ВТ1-0. Одновременно с деформированием растяжением образцов в виде двусторонней лопатки измерялись акустические параметры: скорость и затухание поверхностных рэлеевских волн.

Анализ зависимости скорости поверхностных волн позволил установить, что данные зависимости имеют две характерные (переломные) точки. Отметим, что на участке упругой деформации, согласно эффекту акустоупругости, происходит медленное увеличение скорости ультразвука. Первая точка связана с началом пластического течения (пределом текучести). Данный результат может быть объяснен в рамках дислокационного представления, теории Гранато и Люке. При частоте ультразвука много меньше частоты собственных колебаний дислокации, зависимость скорости ультразвуковых волн может быть представлена как

$$\frac{V}{V_0} = 1 - \frac{4}{\pi^2 A} \Lambda L^2,$$

где V/V_0 – отношение текущего значения скорости ультразвука к значению в ненагруженном состоянии материала; Λ – плотность дислокаций; L – средняя длина дислокационного сегмента; A – константа, зависящая типа дислокаций. Длина дислокационного сегмента в мелкозернистых поликристаллических металлах слабо зависит от деформации, при этом плотность дислокаций увеличивается, что определяет уменьшение скорости звука.

Вторая точка связана с формированием шейки разрушения. Шейка является локальным местом интенсивной пластической деформации, ее положение в пределах области акустических измерений приводит ускорению падения зависимости скорости от общей деформации образца. Положение шейки вне области акустических измерений приводит к медленному росту скорости в результате релаксации внутренних напряжений вне шейки.

Таким образом, зависимость скорости рэлеевских волн от приложенного напряжения характеризуется двумя критическими точками: начало пластического течения и предразрушение образца. Подобные зависимости и критические точки получены для всех исследованных конструкционных материалов, что позволяет говорить об универсальности данного явления.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10025)

МНОГОМАСШТАБНАЯ КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ И ОЦЕНКА РЕСУРСА

Наймак О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, 1, Ак. Королева, Пермь, 614013, Россия,
e-mail: naimark@icmm.ru*

Много- и гигацикловая усталость является важнейшей фундаментальной и инженерной проблемой для различных областей приложений. Серии катастроф, обусловленных разрушением газотурбинных двигателей, в сочетании с высокой стоимостью оценки ресурса и потенциальной стоимостью разработки новых конструкций стимулировали перспективные концепции национальных программ в области много- и гигациклового разрушения, основанные на использовании новых фундаментальных результатов при оценке усталостной прочности [1]. Суть программ заключается в разработке подходов по оценке ресурса, использующих результаты фундаментальных исследований, современных методов лабораторного моделирования и количественного анализа структурных изменений для обоснования оценки стадийности разрушения и закономерностей «критичности» при переходе к макроскопическому разрушению. Устойчивый интерес к гигацикловому диапазону (10^9 циклов) усталостных нагрузок связан с возможностями достижения данного усталостного ресурса вследствие прогресса в создании новых (нано- и субмикроструктурных) материалов, прорывными тенденциями в технологии, обеспечившими экономическую востребованность оценки гигациклового ресурса в области авиационного моторостроения и средств транспорта.

Многомасштабные закономерности разрушения металлов (железа, титана, алюминия) исследуются в условиях многоциклового и сверхмногоциклового усталости [2]. В сопоставлении с результатами структурных исследований развиты теоретические представления о кинетике локализации поврежденности, зарождения и роста усталостных трещин при много- и гигацикловом режимах нагружения с учетом установленных закономерностей «критичности» в твердых телах с дефектами [3]. Стадии зарождения и распространения усталостной трещины анализировали по данным количественной профилометрии поверхностей разрушения. Установлена масштабная инвариантность рельефа поверхности разрушения, что позволило предложить объяснение автомодельного характера зарождения и роста трещин в условиях много- и гигацикловой усталости.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант п. 17-01-00687а).

Литература

1. Bathias C., Paris P. C. Gigacycle fatigue in mechanical practice. – Marcel : Dekker Publisher Co., 2005. – 328p.
2. Experimental and theoretical study of multiscale damage-failure transition in very high cycle fatigue / V. I. Betekhtin, A. G. Kadomtsev, M. V. Narykova, M. V. Bannikov, O. B. Naimark, S. G. Abaimov, I. S. Akhatov, T. Palin-Luc // Physical Mesomechanics. – 2017. – No. 20. – P. 78–89.
3. Naimark O. B., Energy release rate and criticality of multiscale defects kinetics // Int. J. Fracture. – 2016. – No. 202. – P. 271–279.

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БЕЗНИКЕЛЕВОЙ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Наркевич Н.А., Миронов Ю.П., Сурикова Н.С., Дерюгин Е.Е.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия,
e-mail: natmark@list.ru*

При исследовании фазовых превращений и свойств аустенитных сталей исследователи основное внимание акцентируют на криогенной температурной области, в то время как параметры структуры и свойства в температурном интервале отрицательных климатических температур исследованы не достаточно полно. Работа посвящена анализу структурных изменений и исследованию механических свойств высокоазотистой стали при низкотемпературном деформировании.

В работе проведен анализ изменения интегральной интенсивности, полуширины, профиля рентгеновских максимумов и фазового состава в зависимости от температуры деформирования во взаимосвязи с деформационным поведением и механическими характеристиками безникелевой аустенитной стали 07X17A 0.53Г18 (Cr 16,5, Mn 18,8, C 0,07, N 0,53, Si 0,52 мас. %, ост. Fe). Исходную аустенитную структуру стали формировали закалкой от 1100 °С в воде. Механические испытания проводили при статическом растяжении со скоростью 0,18 мм/мин при комнатной температуре (20 °С), в жидком азоте (–196 °С), в ледяной воде (0 °С) и в этиловом спирте, охлажденном жидким азотом до температур (–80...0 °С).

Механические испытания выявили немонотонную зависимость пластичности от температуры деформирования. С понижением температуры испытаний ниже комнатной в интервале –30 ÷ 0 °С одновременно с ростом сопротивления деформированию возрастает пластичность, что свидетельствует о повышении энергоемкости процесса деформации. Особенностью деформационного поведения стали в этом температурном интервале является множественная локализация деформации с образованием минимум двух шеек. Локализация деформации и формирование первой шейки не приводит к разрушению, материал в шейке упрочняется и деформация продолжает дальше развиваться равномерно по длине образца.

Рентгенографические исследования были выполнены на образцах после разрушения. Повышенной пластичности исследуемой стали сопутствуют образование деформационных дефектов упаковки и ε -фазы, сильное диспергирование структуры. Концентрация деформационных дефектов упаковки с понижением температуры испытаний в интервале $t_{ucn} = +20...-50$ °С не изменяется ($\alpha = 0,017$). При дальнейшем понижении $t_{ucn} \leq -60$ °С механизмы деформации, обеспечивающие непрерывный релаксационный процесс, связанные в том числе с образованием ГПУ прослоек в виде ДУ, перестают быть эффективными ($t_{ucn} = -60$ °С, $\alpha = 0,013$; $t_{ucn} = -196$ °С, $\alpha = 0,007$). Температурному интервалу повышенной пластичности соответствует изменение соотношения интенсивностей дифракционных пиков, при котором интенсивность дифракции семейства плоскостей {100} становится равна и даже выше, чем {111}. При понижении $t_{ucn} \leq -60$ °С интенсивности дифракции приближаются к равновесным значениям.

Кроме того, с понижением $t_{ucn} = +20$ до -20 °С отмечается увеличение интенсивности дифракции (доли в структуре) нанокристаллической ГЦК-фазы с теми же, что и у крупнокристаллической ГЦК-фазы межплоскостными расстояниями. При более низких отрицательных температурах эффект низкотемпературного диспергирования постепенно исчезает. На смену ему приходит образование новой фазы с ГПУ-решеткой – ε -фазы. Во всем температурном интервале деформирования от +20 до –196 °С α мартенсит не образуется.

Таким образом, установлено, что в стали, демонстрирующей наивысшие показатели пластичности ($\delta = 78$ %) в температурном интервале от 0 до –30 °С происходит сильное диспергирование структуры, образование дефектов упаковки и начало образования ε -фазы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № [18-08-00221](#).

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ НАНОПОРИСТЫХ УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БЕЗРАЗМЕРНОГО КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ

Наседкин А.В., Корниевский А.С.

*Институт математики, механики и компьютерных наук, Южный федеральный университет,
ул. Мильчакова, 8а, 344090, Ростов-на-Дону, Россия,
e-mail: nasedkin@math.sfedu.ru*

В работе представлен общий подход для вычисления эффективных свойств нанопористых упругих материалов, включающий метод эффективных модулей механики композитов, моделирование представительных объемов с учетом структуры пористости и метод конечных элементов. Для моделирования наноразмерности на границах материала с порами использована известная модель Гуртина–Мурдоха поверхностных напряжений и техника обезразмеривания.

Комплексная методология продемонстрирована для двухфазного упругого композита со специальными условиями, связывающими скачки напряжений в объемах различных фаз с поверхностными напряжениями на межфазных границах. При этом предполагается, что композит может иметь произвольные типы анизотропии в объемах фаз и на интерфейсных границах.

Представлены постановки краевых задач гомогенизации по методу эффективных модулей с поверхностными интерфейсными эффектами, сформулированы обобщенные постановки и описана техника дискретизации по методу конечных элементов. Приведены расчетные формулы для определения эффективных модулей двухфазного композита по краевым решениям задач гомогенизации. Отмечено, что эти задачи можно решать с использованием известного конечно-элементного программного обеспечения, используя для учета поверхностных межфазных напряжений конечные элементы оболочек с опцией мембранных напряжений. Показано, что процедуры гомогенизации пористых композитов с поверхностными напряжениями могут рассматриваться как частные случаи соответствующих процедур для двухфазных композитов при пренебрежимо малых модулях жесткости наноразмерных включений.

Конкретная реализация представленных подходов выполнена в конечно-элементном программном комплексе ANSYS. Для представительного объема, построенного в форме кубической сетки гексаэдральных конечных элементов, описан алгоритм автоматического определения межфазных границ и размещения на них оболочечных конечных элементов. При этом поверхностные элементы также автоматически наделялись структурой анизотропии, получаемой редукцией исходного класса анизотропии объемных элементов на поверхности мембранных конечных элементов. Однако данный подход был реализован только для поверхностных конечных элементов, параллельных осям декартовой системы координат.

Важный этап моделирования заключался в переходе к безразмерным постановкам. В результате обезразмеривания задачи можно перейти к единичным размерам пор, а исходную их наноразмерность учесть в множителях при поверхностных модулях жесткости.

В качестве примера рассмотрены модели пористого материала при различных значениях поверхностных модулей, пористости и количества пор. Отмечено влияние величины площади межфазных границ на эффективные модули пористого материала наноразмерной структуры. В результаты вычислительных экспериментов обнаружены тенденции, аналогичные установленным ранее. Так, если сравнить два подобных тела с обычными размерами и с наноразмерами, то для наноразмерного тела за счет поверхностных напряжений эффективные жесткости будут большими, чем у тела с обычными размерами. Кроме того, эффективные жесткости нанопористого материала при одной и той же пористости могут в зависимости от величин поверхностных модулей, размеров и количества пор как уменьшаться, так и увеличиваться.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 15-19-10008.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ ГОМОГЕНИЗАЦИЯ НЕОДНОРОДНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ПОРИСТОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ЧАСТИЧНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОР

Наседкин А.В., Наседкина А.А., Рыбьянец А.Н.

*Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8 а, 344090, Ростов-на-Дону, Россия,
e-mail: nasedkin@math.sfedu.ru*

В работе исследованы задачи гомогенизации для пористого пьезокерамического материала с частично металлизированными поверхностями пор. Предполагается, что толщина слоя металла на границах пор пренебрежимо мала, и эффект металлизации заключается только в задании граничных условий для эквипотенциальных поверхностей.

Рассматриваемые композиты могут быть получены методом транспорта частиц специальных веществ в пьезокерамические материалы. Для численного определения эффективных свойств этих микропористых пьезокерамических материалов можно использовать подход, включающий метод эффективных модулей, моделирование представительных объемов и конечно-элементное решение набора статических задач теории пьезоэлектричества со специальными граничными условиями. Методология численного определения эффективных свойств микропористых пьезокерамических материалов с полностью и с частично электропроводящими границами пор была разработана авторами ранее, как при учете металлизации только граничными условиями свободных электродов, так и при более общем подходе, включающем и учет механических свойств металлизированных границ пор посредством оболочечных элементов. Следует однако отметить, что ранее рассматривалась только однородно поляризованная пьезокерамика, несмотря на наличие в ней пор и металлизированных поверхностей. В данной работе, проведено исследование и влияния неоднородного поля поляризации на эффективные модули.

По результатам вычислительных экспериментов проведен анализ зависимостей эффективных модулей от пористости для однородного и неоднородного полей поляризации. Было показано, что модули жесткости убывают с ростом пористости как однородного, так и для неоднородного полей поляризации, причем учет неоднородности поля поляризации слабо влияет на значения модулей жесткости. Между тем, эффективные модули диэлектрических проницаемостей обычной пористой пьезокерамики убывают с ростом пористости, но эффективные модули диэлектрических проницаемостей пористой пьезокерамики с металлизированными порами, наоборот, возрастают с ростом пористости до 30 %, причем более сильно для случая неоднородно поляризованной пьезокерамической матрицы композита. Более интересным оказалось поведение пьезомодулей. Так, пьезомодули e_{33} и e_{31} для обычной пористой пьезокерамики убывают с ростом пористости. Между тем для пьезокерамики с металлизированными поверхностями пор пьезомодуль e_{33} также убывает с ростом пористости, в то время как пьезомодуль e_{31} , наоборот, вначале возрастает при увеличении пористости, а затем стабилизируется или слабо убывает. Учет неоднородности поля поляризации для пьезомодуля e_{33} практически не существенен, а для пьезомодуля e_{31} дает немного большее убывание для обычной пористой пьезокерамики и немного большее возрастание для пористой пьезокерамики с частичной металлизацией поверхностей пор.

Таким образом, результаты расчетов показали, что микропористая пьезокерамика с металлизированными поверхностями пор имеет ряд необычных свойств, перспективных для практических применений. Сравнение полученных результатов с аналогичными, приведенными ранее для случая полной металлизации поверхностей пор, показывает, что частичная металлизация немного нивелирует необычные эти свойства эффективных модулей. Результаты расчетов также продемонстрировали, что учет неоднородности поля поляризации пьезокерамического материала композита более существенен для определения эффективных значений пьезомодулей и диэлектрических проницаемостей и менее важен для определения значений эффективных модулей жесткости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-58-48009.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОУПРУГОГО ЭФФЕКТА ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СТАЛЕЙ

Нассонов В.В., Балина О.В.

*Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: [nbmk@tsogu.ru](mailto:nbm@tsogu.ru)*

Испытания на усталость согласно ГОСТ 25.502-79 требуют значительных затрат времени и проводятся при снижении нагрузки для получения долговечности образцов порядка 10^7 циклов. Значительно сократить затраты времени позволяет проведение испытаний с увеличением напряжений, от напряжений заведомо меньших предела выносливости до напряжений начала микропластических деформаций материала, соответствующих достижению значения предела выносливости.

Наиболее чувствительными к началу появления микропластических деформаций являются методы измерения магнитных характеристик [1, 2].

Таким образом, цель настоящей работы – повышение эффективности получения данных при диагностике крупногабаритных металлоконструкций с использованием магнитоупругого эффекта в постоянных полях.

В работе было изучено изменение сигналов гармоник, кратных частоте нагружения, в зависимости от величины напряжений и условий измерения магнитных свойств. При этом в качестве диагностических параметров использованы не только величины, но и фазы сигналов. Установлено, что при развитии микропластической деформации происходит характерное изменение фазы и величины сигнала гармоник. Полученный эффект позволяет повысить точность определения начала микропластических деформаций материала и значительно сократить трудозатраты испытаний.

Литература

1. Gorkunov E.S., Savrai R.A., Makarov A.V., Zadvorkin S.M. Magnetic techniques for estimating elastic and plastic strains in steels under cyclic loading // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2015. № 2. P. 6–15.
2. Нассонов В.В., Новиков В.Ф. Неразрушающее определение предела выносливости магнитоупругим методом // *Заводская лаборатория*. 1984. № 8. С. 62–64.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРОДНОГО ПРЕНАПРЯЖЕННОГО ТЕРМОЭЛЕКТРОУПРУГОГО СТЕРЖНЯ

Ватульян А.О., Нестеров С.А.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация,
Южный математический институт – филиал ВЦ РАН, 362027, Владикавказ, Российская Федерация,
e-mail: 1079@list.ru*

Многие пироматериалы находятся в условиях неоднородного преднапряженного состояния, учет которого позволяет адекватно описывать поведение устройств, использующих явление связанности теплового, механического и электрического полей. Усовершенствование методов диагностики неоднородного преднапряженного состояния в термоэлектродупругих телах – одна из важнейших технических проблем. Среди неразрушающих методов диагностики в последнее время получил распространение метод, основанный на решении коэффициентных обратных задач. Обратные задачи термоэлектродупругости для преднапряженных тел практически не исследованы, что связано с существенной нелинейностью этих задач.

В работе сначала получены линеаризованные уравнения термоэлектродупругости для преднапряженных тел. Для решения нелинейной обратной задачи на основе итерационного процесса получены операторные уравнения 1-го рода. В качестве примера рассмотрена задача термоэлектродупругости для стержня. Для решения обратной задачи используется аппарат интегральных уравнений Фредгольма 2-го рода.

Проведены вычислительные эксперименты по идентификации различных законов изменения преднапряженного состояния. Даны практические рекомендации по выбору наиболее информативных временных интервалов для измерения входной информации. Выяснено, что погрешность восстановления безразмерных характеристик не превышает 8 %.

Предложенный метод нахождения преднапряженного состояния термоэлектродупругого стержня может оказать большое влияние на совершенствование теоретических основ неразрушающего контроля изделий из пироматериалов.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-01-00354).

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОЭЛЕКТРОУПРУГОСТИ ДЛЯ ПРЕДНАПРЯЖЕННОЙ ПЛАСТИНЫ–ПОЛОСЫ

Ватульян А.О., Нестеров С.А.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация,
Южный математический институт – филиал ВНИИ РАН, 362027, Владикавказ, Российская Федерация,
e-mail: 1079@list.ru*

В основе функционирования различных диагностических приборов часто лежит явление пирозффекта. При этом пироматериалы могут находиться в условиях неоднородного преднапряженного состояния. При этом в расчетах многие исследователи ограничиваются степенными или экспоненциальными законами неоднородности. Актуальным является построение решения задачи термоэлектроупругости при произвольных законах неоднородности.

При использовании метода множителей Лагранжа в пространстве трансформант по Лапласу был составлен единый функционал для решения задач термоэлектроупругости на основе вариационного подхода.

В качестве примера применения вариационного подхода рассмотрена нестационарная задача термоэлектроупругости для преднапряженной пластины–полосы, находящейся в состоянии плоской деформации. Поставлена задача определения наведенного потенциала на электродах. С учетом тонкостенности пластины в работе приняты гипотезы о строении физических полей, аналогичные гипотезам Кирхгофа. Используя вариационный принцип, получим систему уравнений и граничных условий, которая естественным образом разделяется на две независимые задачи: 1) растяжение–сжатие; 2) изгиб.

Каждая из полученных задач в трансформантах решалась на основе метода пристрелки. Обращение трансформант осуществлялось на основе метода Дурбина. Проведены вычислительные эксперименты по влиянию различных законов распределения преднапряжений на наведенный электрический потенциал.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-01-00354).

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА ДЛЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОБЛАСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Спевак Л.Ф., Нефедова О.А.

ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация,
e-mail: ifs@imach.uran.ru, nefedova@imach.uran.ru

В работе рассмотрено уравнение Пуассона для осесимметричной области Ω

$$\Delta u(x) = f, \quad x \in \Omega \quad (1)$$

с известными краевыми условиями на граничной поверхности $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$

$$\begin{aligned} u(x) &= u^*(x), \quad x \in \Gamma_1; \\ q(x) &= \frac{\partial u(x)}{\partial n} = q^*(x), \quad x \in \Gamma_2, \end{aligned} \quad (2)$$

обладающими осевой симметрией.

К решению уравнения (1) приводит большое количество математических моделей физических задач. Например, задачи о потенциальном течении жидкости, задачи о потенциале стационарного тока и электростатического поля, задачи о стационарном тепловом поле.

Для решения задачи (1), (2) в данной работе был использован метод граничных элементов [1]. Соответствующие задаче граничное интегральное уравнение и фундаментальное решение были рассмотрены в цилиндрической системе координат. Коэффициенты системы линейных алгебраических уравнений, полученной в результате дискретизации граничного интегрального уравнения, содержат интегралы по граничным элементам от специальных функций – полных эллиптических интегралов первого и второго рода. Эти интегралы вычислялись с помощью простой квадратурной схемы Гаусса, за исключением интегралов по элементам, содержащим точки сингулярности эллиптических интегралов. При вычисления сингулярных интегралов применялся адаптивный алгоритм численного интегрирования, учитывающий известные координаты особых точек.

Методика была положена в основу программы, написанной на языке программирования C++ с использованием технологий параллельного программирования. Для выполнения численных расчетов использовалась библиотека GSL [2], а для реализации параллельных вычислений – стандарт OpenMP [3]. Работа программы была проверена на тестовых задачах, имеющих аналитическое решение. Результаты расчетов показали высокую точность моделирования. Решены некоторые содержательные примеры.

Работа выполнена в рамках государственного задания, тема № 0391-2016-0001.

Литература

1. Бреббия К., Телес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. – М. : Мир, 1987.
2. GSL–GNU. Scientific Library. – Available at: <http://www.gnu.org/software/gsl/> (accessed 12.02.2018).
3. OpenMP. – Available at: <http://www.openmp.org/> (accessed 22.02.2018).

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ ЛЬДИСТОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Николаева М.В.^{1,2}, Стручкова Г.П.³, Атласов Р.А.^{1,2}

¹ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
д. 58, ул. Белинского, г. Якутск, 677000, Россия,
e-mail: mv.nikolaeva@s-vfu.ru

²ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН,
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Россия,
e-mail: atlasov.rinat@mail.ru

³ФГБУН Институт физико-технических проблем Севера СО РАН,
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Россия,
e-mail: g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru

Эксплуатационная надежность линейной части трубопроводной системы существенно зависит от адекватности моделирования теплосилового взаимодействия трубопровода с грунтом.

Тепловое взаимодействие трубопровода с мерзлым грунтом приводит к оттаиванию и разжижению грунта. При оттаивании мерзлых грунтов резко нарушается структура грунта, что обуславливает ухудшение его физико-механических свойств. Такое оттаивание сопровождается развитием тепловой осадки под трубопроводом, неравномерность развития которой может послужить причиной критической деформации трубопровода и, как результат, возникновения аварийной ситуации.

Для оценки несущей способности подземных трубопроводов, проложенных в криолитозоне, нужно решить совместно задачу теплового взаимодействия трубопровода и мерзлого грунта и прочностную задачу.

Рассмотрены два типа грунтов (суглинков и супесь) с различными значениями льдистости (льдистые и сильнольдистые).

Для описания теплового взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами выбрана энтальпийная модель Кроника [1], учитывающая переменность характеристик грунтов в зависимости от изменения их температуры, изменение тепловой энергии, сохраненной в грунте в процессе промерзания-протаивания с изменения температуры грунта.

Расчеты производятся с учетом температуры нефти по длине трубопровода (10 °С), физико-механических характеристик и температуры вмещающих грунтовых массивов и региональных природно-климатических характеристик, также учитываются сложные условия теплообмена на поверхности и теплота фазовых превращений. Задача решается методом конечных элементов, размер расчетной области – 80×20 м; размер шагов сетки – 0,1 м; диаметр трубопровода принят равным 1220 мм при толщине стенки 19 мм.

По результатам теплового расчета ведется расчет тепловой осадки мерзлого грунта с учетом глубины протаивания, сжимаемости и нагрузки на мерзлый грунт [2].

Установлено, что в сильнольдистых грунтах расчетное значение глубины протаивания наименьшее, поскольку значительная часть тепла от трубопровода затрачивается на фазовое превращение «вода–лед», однако протаивание сильнольдистых грунтов приводит к наибольшей осадке.

Следующим этапом является определение НДС трубопровода с учетом тепловой осадки. Оценка напряженно-деформированного состояния выполнена для участка подземного трубопровода с определенными прочностными свойствами трубы, физико-механическими и теплофизическими свойствами грунтов. Материал трубы Сталь 09Г2С ГОСТ 10705-80.

Задача решается методом конечных элементов, расчеты производятся с учетом влияния тепловой осадки. Воздействие прилегающего грунта на трубопровод моделируется конечными элементами с нелинейной силовой характеристикой [3], каждый из которых моделирует сопротивление грунта при движении трубопровода в вертикальном, горизонтальном

и продольном направлениях. Для каждого элемента необходимо задать свойства, определяющие силовые характеристики. Силовые характеристики описываются полуэмпирическими зависимостями сопротивления грунта продольным и поперечным перемещениям трубы.

Результаты оценки НДС трубопровода показывают, что расчетные эквивалентные напряжения не превышают допускаемых напряжений, однако при наличии концентратора напряжений могут возникнуть недопустимые напряжения. Согласно [4], установлен максимальный допустимый размер поверхностного дефекта для данной задачи.

При длительной эксплуатации вследствие деформационного старения металла происходит снижение свойств пластичности. Установлено, что коэффициент старения для хладостойкой трубной стали равен 1,1–1,34 [5].

Результаты проведенного исследования показывают, что при оценке надежности линейной части трубопроводной системы необходимо обратить особое внимание на определение теплофизических параметров мерзлого и талого грунтов, свойства которых сильно зависят от значения льдистости и температуры. Необходимо также учитывать изменение типов грунтов вдоль трубопровода, при этом расчет должен выполняться для каждого участка с учетом смены типа грунтов и их состояния, поскольку в зависимости от значения льдистости грунтов будут изменяться значения тепловых осадков и, соответственно, критические напряжения, возникающие в трубопроводе. Неравномерность тепловых осадков влияет на допустимый размер поверхностных дефектов, что является критическим фактором для оценки степени опасности находящихся в эксплуатации магистральных трубопроводов с поверхностными дефектами.

Литература

1. Кроник Я. А. Термомеханические модели мерзлых грунтов и криогенных процессов // Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение / АН СССР. – М. : Наука, 1982. – С. 200–212.
2. Пермяков П. П., Аммосов А. П., Попов Г. Г. Оценка величины пучения и осадка линейных сооружений в мерзлых грунтах // 14-й Минский международный форум по тепло-массообмену. – Минск : ГНУ «ИТМО им. А.В. Лыкова», 2012.
3. Анализ моделей силового взаимодействия подземного трубопровода с окружающим грунтом / М. В. Николаева, С. С. Бердыев, В. В. Попов, А. В. Иванов, Т. А. Капитонова, Г. П. Стручкова // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 11. – С. 35–38.
4. ВРД 39-1.10-004-99. Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного ресурса.
5. Вотинин А. В. Оценка структурных параметров сталей и ресурсных характеристик резервуаров. Оценка структурных параметров сталей и ресурсных характеристик резервуаров для хранения нефтепродуктов в условиях длительной эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. – Краснодар, 2016.

АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ИЗЛУЧАЕМОЙ ОТДЕЛЬНЫМИ ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРЫ ГЦК РЕШЕТКИ. МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Никонов А.Ю.^{1,2}, Жармухамбетова А.М.¹

¹Томский государственный университет, пр. Ленина 36, г. Томск, 634050, Россия

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия,

e-mail: anickonoff@ispms.ru, zharmukhambetova@gmail.com

Одним из актуальных применений анализа акустической эмиссии является контроль режима технологического процесса в условиях промышленного производства, а также обнаружение побочных явлений, влияющих на качество производимых изделий, например выявление нежелательных вибраций или автоколебаний. При этом возникает необходимость выявлять, что является источником акустического сигнала: процессы пластической деформации материала (изменение внутренней структуры) или механическое взаимодействие заготовки с инструментом в процессе обработки (трение, вибрации и т. п.). Ввиду сложной внутренней структуры поликристаллических материалов и множества процессов, протекающих в ходе пластической деформации в объеме заготовки, затруднительно интерпретировать источники акустической эмиссии. Ранее было показано, что гармоническое движение дислокаций в ходе пластической деформации кристаллитов или зерен может являться источником акустической эмиссии. С использованием методов молекулярной динамики обнаружено, что на атомном масштабе акустическая эмиссия определяется изменениями уровней как потенциальной, так и кинетической энергии.

Цель настоящей работы – изучение связи возникающих дефектов структуры и изменений внутренней энергии образца с сигналами акустической эмиссии при наноиндентировании.

Для исследования процессов на атомном масштабе был выбран метод молекулярной динамики. Моделировался монокристаллический образец со свойствами меди в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $18 \times 18 \times 9$ нм. Ориентация кристаллической решетки варьировалась в различных задачах. Вдоль оси Z лабораторной системы координат задавались периодические граничные условия. Система рассматривалась как канонический ансамбль (NVT), содержащий около 200 000 атомов. Температура образца составляла 5 К. Низкая температура использовалась для исключения эффекта теплового колебания атомов. Для нагружения системы использовался «комбинированный» индентор. Он представлял собой абсолютно жесткий цилиндр диаметром 2 нм, состоящий из атомов меди, и полевой цилиндрический индентор радиусом 2,2 нм. Оси инденторов совпадали и были расположены вдоль оси Z . Материальный индентор задавал адгезионные свойства за счет взаимного притяжения атомов. На атомы образца, попадающие внутрь области полевого индентора, действовали силы по направлению от оси цилиндра. Таким образом, полевой индентор уменьшал силы адгезии между атомами образца и индентора. Моделировали 2 этапа нагружения образца. На первом происходило вдавливание индентора с постоянной скоростью $0,1 \text{ \AA/пс}$. После погружения на глубину 1 нм к линейному перемещению с постоянной скоростью добавляли колебательное движение с амплитудой $A(t) = 0,05 \text{ \AA/пс}$ и частотой $\omega = 1/3 \text{ пс}^{-1}$. Для анализа акустического отклика системы на нагружение изучали состояние сенсоров, представленных в виде отдельных атомных площадок, расположенных на поверхности образца. Анализировали колебания сил, действующих на сенсор, изменение скорости движения центра масс сенсора, изменения внутренней энергии системы и образование дефектов в ходе нагружения. Обнаружено, что процессы формирования вблизи индентора дефектов структуры типа дислокаций и выхода их на поверхность сопровождаются явно выраженными колебаниями сил, действующих на выделенные атомные площадки и упругими волнами, распространяющимися в образце.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №17-79-10081.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АМГ6 И Д16Т ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ГИГАЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Оборин В.А., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, д. 1, Ак. Королева, Пермь, 614013, Россия, e-mail: oborin@icmm.ru

В работе проведено исследование кинетики роста усталостных трещин в сплавах алюминия АМг6 и Д16Т в режиме гигацикловой усталости при предварительном динамическом деформировании. Актуальность постановки определяется важными приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полетного цикла при случайных динамических воздействиях.

Предварительное нагружение образцов динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского при скоростях деформации до $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$, после чего образцы подвергались циклической нагрузке ($R = -1$) при постоянном воздушном охлаждении с последующим изучением фрактографии изломов.

Усталостное нагружение проводилось на испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 при уровнях напряжений 105–162 МПа. Ультразвуковая испытательная машина позволяет испытывать материалы на базе 10^9 – 10^{10} циклов с амплитудой от одного и до нескольких десятков микрон с частотой 20 кГц, что сокращает время испытания до нескольких дней в отличие от классических усталостных установок, на которых такое число циклов достигается за годы испытаний.

При разрушении на базе 10^8 циклов и более в предварительно динамически нагруженных образцах из сплава АМг6 трещина образовывалась внутри образца и на поверхности разрушения наблюдалась характерная для такого режима усталости область излома – «рыбий глаз» («fish-eye»), в центре которой находился очаг разрушения, окруженный областью с фрагментированной (субмикроструктурной) структурой. Обнаружено снижение на 15–25 % предела усталости предварительно нагруженного сплава АМг6 с уровня напряжения 162 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 121–138 МПа, соответствующего критическому количеству циклов $\sim 7,5 \cdot 10^8$. Обнаружено снижение на 14–20 % предела усталости предварительно нагруженного сплава Д16Т с уровня напряжения 150 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 120–130 МПа, соответствующего критическому количеству циклов $\sim 3,5 \cdot 10^8$.

Химический состав сплава АМг6 определялся с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400n по спектру излучения отраженных электронов с помощью модуля INCA. Исследовался спектр излучения в двух областях. Было обнаружено, что в области рядом с «fish-eye» Al и Mg 86 % и 14 % соответственно. На вершине «fish-eye» содержание Al и Mg 94 % и 6 % как и положено для сплава АМг6.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-08-01186_a, 16-48-590534p_a, 16-41-590892, 17-08-00905, [17-41-590149](#), 17-01-00867).

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ТЕЛ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ

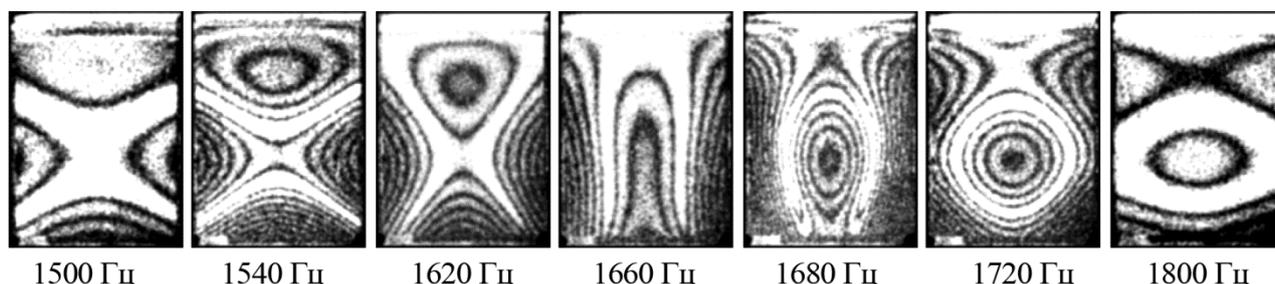
Одинцев И.Н.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
4, Малый Харитоньевский пер., Москва, 101990, Россия, e-mail: ino54@mail.ru*

Теоретический и практический интерес вызывает исследование закономерностей колебаний тел, контактирующих с жидкой средой. При этом могут рассматриваться случаи как их полного или частичного погружения в жидкость, так и заполнения жидкостью внутренних полостей в объектах (баках, цистернах и т. п.). Возможности аналитических методов в решении таких задач весьма ограничены. Вычислительные методы на основе, например, конечно-элементного моделирования позволяют выполнять некоторые оценки виброхарактеристик тел в этих условиях, однако и здесь оказывается затруднительным адекватный учет всего комплекса физических и геометрических параметров, оказывающих влияние на рассматриваемое явление, т. е. не только присоединенных масс, но и вязкости жидкости, ограниченности ее объема (толщины слоя) и др. В этой связи особую роль в получении необходимой достоверной информации приобретают методы экспериментального анализа.

Применение традиционных средств виброметрии для достижения поставленных целей, особенно при погружении исследуемых объектов полностью в жидкую среду, может оказаться трудно реализуемым. Эффективным инструментом для изучения особенностей их виброповедения (при условии прозрачности жидкости) служат бесконтактные когерентно-оптические методы, в частности электронная цифровая спекл-интерферометрия. С ее помощью визуализируются полные поля амплитудных перемещений в виде интерферограмм с ценой полос в десятые доли микрометра. Регистрация и оцифровка совокупности таких картин, отвечающих ряду окolorезонансных частот возбуждения, позволяют по известным методикам оценивать декремент колебаний тел.

Возможности, преимущества и техника реализации методов спекл-интерферометрии рассматриваются на примере изучения колебаний лабораторных образцов тонкостенных элементов конструкций. В частности, здесь наглядно обнаруживаются эффекты «взаимодействия» форм их колебаний в жидкости на относительно близких частотах. Так, на рисунке демонстрируется случай непрерывной трансформации поля амплитуд колебаний прямоугольной консольной пластины ($70 \times 50 \times 1,5$) в «неограниченной» водной среде. Практический интерес вызывает также исследование зависимости параметров виброповедения тела от толщины слоя соприкасающейся жидкости. Например, приближение той же пластины к жесткой стенке на расстояние 1 мм приводило к смещению частот возбуждения колебаний аналогичного вида в диапазон 1250÷1450 Гц. В ряде случаев в условиях такого – пристеночного – расположения объектов возникают также качественные изменения его виброповедения, наглядно выявляемые методами спекл-интерферометрии.



Непрерывная трансформация поля амплитуд колебаний прямоугольной консольной пластины ($70 \times 50 \times 1,5$) в «неограниченной» водной среде

Полученные таким образом экспериментальные данные, имея самостоятельное значение для понимания процессов взаимодействия колеблющихся тел с жидкой средой, могут служить для создания верификационных примеров, используемых при разработке и совершенствовании соответствующих расчетных моделей и методик вычислительного анализа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 14-19-00776 - П.

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИГИДРОКСИБУТИРАТА С КОМПЛЕКСАМИ ЖЕЛЕЗО (III) – ТЕТРАФЕНИЛПОРФИРИН^{1,2}

Ольхов А.А.^{1,2,3}, Тюбаева П.М.^{1,3}, Карпова С.Г.³, Лобанов А.В.²,
Попов А.А.^{1,3}, Иорданский А.Л.²

¹ФГБОУ ВО Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
36, Стремянный пер., Москва, 117997, Россия,
e-mail: aolkhov72@yandex.ru

²ФГБОУ Институт химической физики им. Н.Н. Семенова, Российской академии наук,
4, ул. Косыгина, Москва, 119334, Россия,

³ФГБОУ Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля, Российской Академии наук,
4, ул. Косыгина, Москва, 119991, Россия

Создание терапевтических систем нового поколения на основе инновационного класса «умных» полимеров ставит перед специалистами новую задачу: разработку полимерных материалов с геометрией, структурой и функциями, которые соответствуют требованиям современной биомедицины. Одним из перспективных видов матриц с антисептическими свойствами являются нано- и микроволокнистые нетканые материалы, получаемые методом электроформования (ЭФ). Метод основан на вытягивании полимерного раствора в тонкую струю в поле действия механических и электростатических сил и формированием волокна с диаметрами от 10 нм до 10 мкм.

Цель настоящего исследования – получение нетканого волокнистого материала на основе природного биополимера полигидроксибутирата с комплексом железа (III) с тетрафенилпорфирином (FeClTP) методом электроформования и изучение его структурной организации. Концентрация ПГБ в хлороформе составляла 7 % мас. Содержание FeClTP в формовочном растворе – 1; 3; и 5 % мас., относительно массы ПГБ. Волокна получали методом ЭФ с помощью однокапиллярной лабораторной установки с диаметром капилляра 0,1 мм (напряжение электрического тока 12 кВ, расстояние между электродами 18 см, электропроводность раствора 15 мкСм). Исследование структуры образцов проводили методами ДСК (DSC 204 F1 фирмы Netzsch в среде аргона со скоростью нагрева 10 град./мин), ЭПР (Россия) и сканирующей электронной микроскопией («Hitachi TM-3000», Япония).

Введение малых концентраций порфирина приводит к заметным изменениям кристаллической организации ПГБ из-за изменения геометрических параметров и плотности упаковки волокон. Было установлено, что введение FeClTP в ПГБ приводит во-первых, к росту степени кристалличности ПГБ, а во-вторых, к уплотнению аморфной фазы полимера при формировании волокна. Доля плотных областей при увеличении концентрации FeClTP возрастает.

Полученные в работе волокнистые материалы ПГБ – FeClTP являются новым классом полимерных модификаций биологически активных соединений с бактерицидными свойствами. Это на сегодняшний день активно развивающаяся отрасль химической технологии. Биологические испытания нетканых материалов показали, что волокна, содержащие FeClTP, активны в отношении бактериальных тест-культур. Это показывает актуальность и целесообразность создания на основе полимерных волокнистых матриц и металлокомплексов порфиринов средств дезинфекции в отношении условно-патогенных и патогенных микроорганизмов.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РЭУ им. Г.В. Плеханова.

²Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования ИБХФ им. Эмануэля РАН.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОМПОНЕНТ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ТЕКСТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ И КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Остапович К.В., Трусов П.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия,
e-mail: ostkirvad@gmail.com*

Поликристаллические металлы и сплавы, подвергнутые интенсивным неупругим деформациям, могут испытывать значительное перестроение внутренней структуры, обуславливающее изменение их эффективных физико-механических свойств. В зависимости от вида нагружения, в материале при этом может возникать та или иная кристаллографическая текстура, характеризующаяся определенными преимущественными ориентациями кристаллитов. Представляет интерес установление подобных ориентаций, а также исследование их взаимосвязи с параметрами процесса деформирования. Для решения задач в работе используются многоуровневые модели поликристаллов, основанные на физических теориях упруговязкопластичности.

В рамках обозначенного подхода идентификацию компонент кристаллографических текстур предлагается осуществлять с привлечением аппарата кластерного анализа. Реализованный алгоритм оперирует с дискретной выборкой ориентаций кристаллитов и выявляет скопления ее элементов, близких друг к другу по специальной полуметрике, учитывающей геометрическую симметрию решетки. В ходе его выполнения для заданной конфигурации поликристаллического агрегата строится матрица разориентации кристаллитов, к которой в дальнейшем могут быть непосредственно применены абстрактные методы медоидной кластеризации. Таким образом, анализируемая выборка разбивается на непересекающиеся подмножества (кластеры), в каждом из которых определяется элемент (медоид) с наименьшим средним отклонением от других ориентаций того же кластера. Следует отметить, что наиболее распространенные приемы кластеризации основываются на эвристической минимизации суммарного среднего отклонения ориентаций кластеров от соответствующих им медоидов, поэтому для адекватного результата требуется выбор подходящего начального приближения. При этом на практике число кластеров, как правило, является априори неизвестным. С целью преодоления указанных трудностей было предложено использовать предварительную процедуру, устанавливающую ориентации с наиболее плотными окрестностями и объединяющую достаточно близкие из них в отдельные подобласти.

Полученные в результате кластеризации медоиды трактуются как моды распределения ориентаций кристаллитов. Информация об их интенсивности и рассеянии дает возможность локальной аппроксимации этого распределения в соответствующих кластерах. При этом статистическая достоверность такой аппроксимации, или ее частных плотностей, может рассматриваться в роли внутреннего критерия качества проведенной кластеризации.

Изложенная методика позволяет редуцировать описание распределения ориентаций кристаллитов в текстурированном поликристалле до относительно небольшого числа ориентационных мод. Полученные в вычислительном эксперименте оценки для осредненных упругих характеристик демонстрируют удовлетворительный результат при агрегировании свойств с использованием подобного способа представления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-41-590694-р_а, № 17-01-00379-а).

О РАСПОЛОЖЕНИИ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА В КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ В ЗАДАННОМ ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

Ошмарин Д.А., Юрлов М.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
1, Ак. Королева, Пермь, 614013, Россия,
e-mail: oshmarin@icmm.ru*

В настоящее время активно развиваются методы мониторинга состояния конструкции в режиме реального времени, основанные на применении smart-технологий, развитие которых, несомненно, становится одной из важнейших задач в таких областях, как микроэлектроника, информатика, медицина, энергетика, транспорт, и др. Преимуществом этой техники является то, что она может быть осуществлена для непрерывного контроля on-line; на объектах, доступ к которым проблематичен или невозможен (находящихся в космосе или под водой) и др. Данные методики широко применяются для мониторинга состояния мостов, ответственных инженерных сооружений (промышленных, исторических или высотных зданий и др.), а также для дефектоскопии отдельных объектов, например, для обнаружения износа вагонных колес.

Любые изменения в характеристиках конструкции, таких как например местная потеря жесткости, вызванная появившимся дефектом любой природы, создадут аномалии в пространстве упругих волн, изменят значения собственных частот колебаний конструкции и, соответственно, сигналы, получаемые от системы датчиков, являющейся неотъемлемой частью smart-конструкций. Эти изменения можно анализировать в режиме реального времени, определяя на основе этой информации местоположение и размер появившегося дефекта.

В методиках неразрушающих оценок наличия повреждений конструкций, основанных на вибрационных подходах, в качестве актуаторов и сенсоров эффективно применяются пьезоэлементы, которыми дополняется рассматриваемая конструкция. Такие подходы основаны на возбуждении гармонических колебаний или волновых процессов в рассматриваемой конструкции с помощью актуаторов с последующей регистрацией сигнала с помощью сенсоров. На основе анализа изменений в регистрируемом сигнале может быть обнаружено изменение в характеристиках конструкций, которые могут быть вызваны повреждением.

Одной из ключевых проблем для обеспечения эффективной работы пьезоэлементов является определение их месторасположения на конструкции. Этому вопросу уделяется большое внимание исследователей во всем мире. Но несмотря на обилие методов и подходов, до сих пор размещение пьезоэлемента является, скорее, искусством, основанным на интуиции исследователей. В связи с этим дальнейшее развитие подходов к поиску оптимального месторасположения пьезоэлемента с точки зрения минимизации интуитивных составляющих в принятии решений является крайне важным.

Традиционно в качестве величины, позволяющей оценить эффективность работы пьезоэлемента в конструкции на динамических режимах, выбирается коэффициент электромеханической связи (КЭМС), количественно характеризующий долю преобразованной механической энергии колебаний в электрическую, и обратно. При этом условием достижения оптимальности расположения пьезоэлемента является наибольшее значение КЭМС, что справедливо для анализа динамического поведения конструкции только на одной резонансной частоте колебаний. При этом для определенного месторасположения может иметь место ситуация, при которой пьезоэлемент будет абсолютно неэффективен на других частотах. Поэтому проблема расположения пьезоэлемента на конструкции таким образом, чтобы обеспечить возможность получения и обработки сигнала в некотором частотном диапазоне, занимает особое место.

В работе предлагается подход к определению расположения пьезоэлемента на конструкции для получения наиболее полной информации о ее динамическом поведении в заданном диапазоне частот внешнего воздействия, включающем несколько собственных частот колебаний конструкции. Для оценки эффективности расположения пьезоэлемента предлагается новый параметр, основанный на суперпозиции КЭМС для собственных частот колебаний, входящих в заданный частотный диапазон.

Эффективность предложенного подхода продемонстрирована численно на ряде примеров.

Работа выполнялась при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 18-31-00080-мол_а).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ

Палкин Д.Д., Чекалкин А.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: 13denis01@mail.ru, a.a.chekalkin@yandex.ru*

С развитием современного машиностроения исследуются новые материалы с улучшенными характеристиками триботехнического назначения для замены традиционных материалов в узлах трения конструкций, например, подшипники. Одними из наиболее перспективных материалов триботехнического назначения являются волокнистые полимерные композиционные материалы.

В работе рассматривается численное моделирование контактного взаимодействия волокнистых полимерных композиционных материалов со сталью. В качестве объектов исследования рассматриваются стеклопластик и углепластик на основе эпоксидной смолы. Композиционный материал считается двухкомпонентной средой с изотропными элементами тетрагональной структуры.

Цель работы – на основе метода механики композиционных материалов метода локального приближения [1] получение эффективного коэффициента трения в условиях сухого трения в плоской постановке и оценка его влияния на контактное взаимодействие.

Численное моделирование проводилось при различных случаях изнашиваемости композиционного материала с использованием программного пакета «ANSYS» [2,3].

В результате численного моделирования получены поля контактных напряжений и определены эффективные коэффициенты трения стеклопластика и углепластика при различных случаях изнашиваемости. Проведена оценка влияния свойств компонентов волокнистых композиционных материалов на трибосистему.

В дальнейшем планируется рассмотреть материалы с гексагональной и случайной структуры.

Литература

1. Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. – М. : Наука, 1984. – 115 с.
2. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. – М. : Едиториал, УРСС, 2003. – 272 с.
3. Басов К. А. ANSYS. Справочник пользователя. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРИКЦИОННОГО ИЗНОСА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ НАГРЕВА

Панин С.В., Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Люкшин П.А.,
Гришаева Н.Ю., Матолыгина Н.Ю.

*ИФПМ СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: svp@ispms.ru*

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются в качестве материалов, работающих в узлах трения. При моделировании трения важными параметрами являются геометрические характеристики контактирующих поверхностей – волнистость и шероховатость – изменяющие фактическую площадь контакта.

В зоне трения одновременно реализуется большое множество элементарных фрикционных связей, происходит превращение работы сил трения в тепловую энергию трущихся тел, что приводит к изменению физико-механических свойств материалов.

Предлагаемый подход к моделированию ПКМ в условиях трибосопряжения позволяет рассчитывать температуру контактирующих тел и исследовать ее влияние на износостойкость.

Моделируется процесс, происходящий при экспериментальном изучении износостойкости материалов на машине трения по типу вал–колодка. Последовательно решаются две задачи: 1) задача о напряженно-деформированном состоянии (НДС) покрытия с учетом нормальной и касательной нагрузок, возникающих при трении, 2) задача нестационарной теплопроводности, позволяющая найти распределение температуры в контактирующих телах и ее влияние на изменение их свойств.

Задача о НДС основана на решении системы уравнений механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов. Задачи решаются в плоской постановке.

Расчет температуры контактирующих тел производится из условия, что работа сил трения переходит в тепло. Кроме того, переходит в тепло энергия пластической деформации поверхностных слоев материалов. Расчеты показали, что вклад энергии пластических деформаций незначителен (доли процента от работы сил трения) и ее можно не учитывать.

Расчет проводится в квазистатической постановке, время играет роль параметра, определяющего количество полученной теплоты за счет работы сил трения. На каждом шаге уточняется область контакта, определяется нормальная и касательная нагрузка, рассчитывается НДС, рассчитывается количество теплоты, полученное при трении, определяется распределение температуры в контактирующих телах и изменение коэффициента трения. Свойства материала в каждой конечно-элементной ячейке определяются в зависимости от температуры в ней.

На каждом шаге проверяются критерии разрушения максимальных растягивающих напряжений и интенсивности напряжений. При выполнении одного из критериев реализуется разрушение, которое моделируется удалением из расчета элементов, в которых реализовался критерий разрушения. После этого формируется новая граница контакта и перестраивается конечно-элементная сетка.

Модель позволяет рассматривать микронные размеры шероховатости поверхности и (или) наличие включений в структуре полимерного материала.

При удалении ячеек конечно-элементной сетки как для гладкой, так и для шероховатой поверхностей наблюдаются колебания температуры и нагрузки, изменение площади контакта, но температура со временем стремится к некоторому постоянному значению, что отвечает установившемуся режиму.

В качестве примера рассмотрен процесс трибоизноса поверхности покрытия из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Расчетная зависимость износа изначально гладкой поверхности СВМПЭ от времени качественно совпадает с экспериментальными данными.

Таким образом, разработанные физическая и математическая модели, вычислительный алгоритм позволяют определить в плоском приближении детальные распределения параметров НДС и температуры, в том числе с учетом неоднородности структуры материала, и учесть влияние температуры на свойства ПКМ. Показано, что основной вклад в увеличение температуры контактирующих поверхностей вносит работа сил трения. Полученные результаты качественно соответствуют экспериментальным данным.

Работа выполнена в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» Министерства образования и науки РФ; Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТРУБ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Панин С.В., Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Люкшин П.А.,
Матольгина Н.Ю., Реутов Ю.А.

ИФПМ СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: svp@ispms.ru

Проблема надежности изделий является актуальной для изделий из полимерных композиционных материалов в связи с тем, что для композитов характерны такие особенности, как значительный разброс деформационно-прочностных характеристик на стадии изготовления изделий, а также деградация свойств материалов со временем.

Одним из способов решения этой проблемы является использование комбинированных конструкций, когда в изделии одновременно используются различные материалы. В частности, при изготовлении трубопроводов применяются трехслойные трубы (рис. 1 *а*), обычно средний слой (арамид) является несущим и воспринимает основную нагрузку, а наружный и внешний слой (полиэтилен) несут герметизирующие и защитные функции.

В работе представлен пример расчета надежности трехслойной трубы, когда на внутренней стенке задано давление и температура 60 °С, а внешняя поверхность свободна от напряжений при нулевой температуре. Решение задачи теплопроводности осуществлялось методом конечных элементов. На рис. 1 *б* и *в* приведены распределения температуры по толщине стенки трубы.

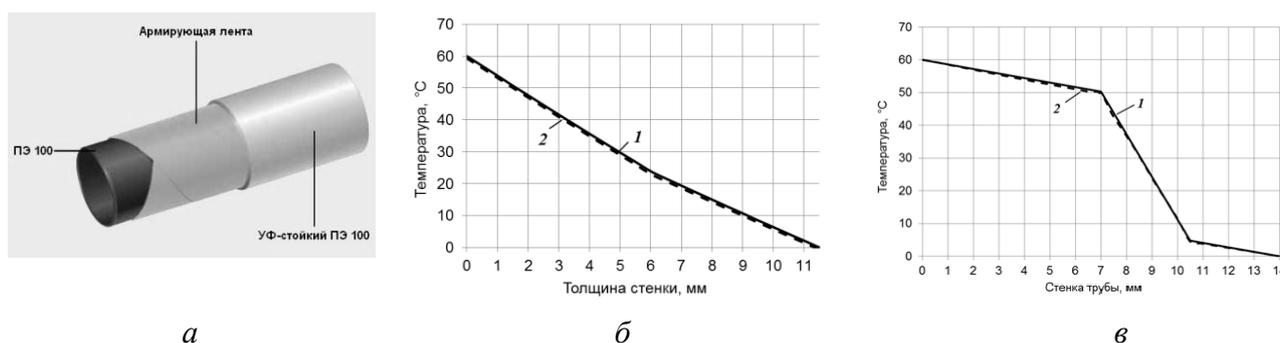


Рис. 1. Общий вид трубы (*а*) и распределение температуры в однослойной трубе (*б*) и трехслойной (*в*)

При расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) получены напряжения и перемещения с учетом зависимости модуля упругости и предела текучести материалов от температуры.

В расчете показано, что в среднем армирующем слое, воспринимающем нагрузку, возникает скачок напряжений. Расчет вероятности безотказной работы трехслойной армированной трубы был произведен по критерию прочности.

Вероятностный характер свойств материалов определяли модулями упругости, подчиняющимися закону нормального распределения с коэффициентом вариации 10 %. Критерием прочности служил предел текучести материала, который также имел случайный характер (коэффициент вариации 10 %).

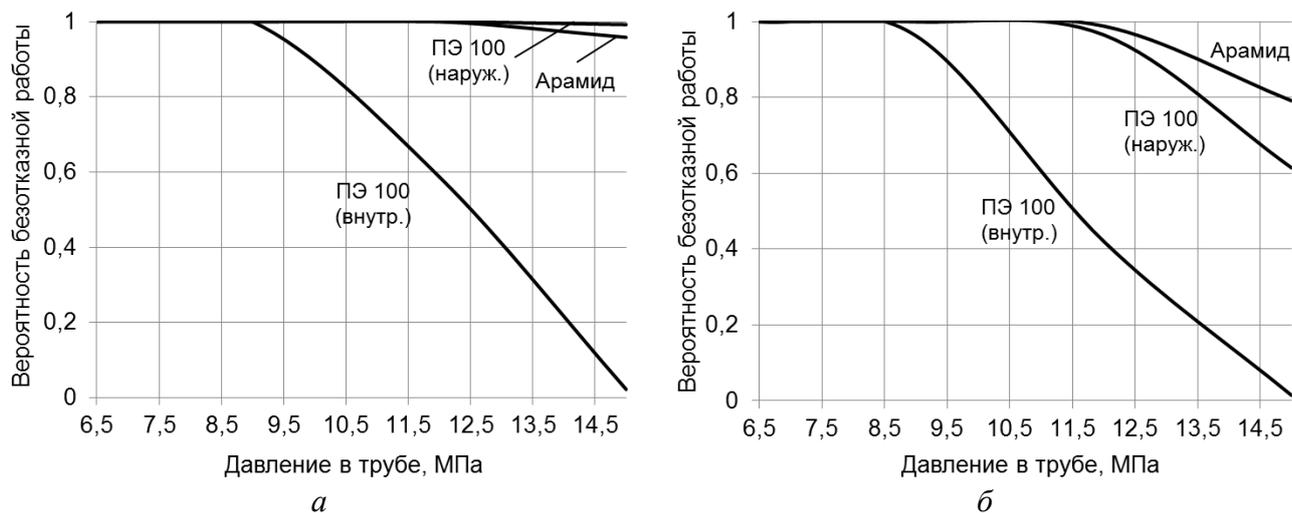


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы слоев трубы от давления при температуре 20 °С (а); от давления при наличии температурного перепада (б)

Результаты расчета вероятности безотказной работы при постоянной температуре показывают значительно меньшую надежность внутреннего полиэтиленового слоя по сравнению с остальными слоями. Максимально допустимое давление в трубе, равное 6,5 МПа, характеризуется стопроцентной ВБР, однако при росте давления, начиная со значения 9 МПа, вероятность безотказной работы начинает резко снижаться. Вероятность безотказной работы 95 % соответствует давлению 9,5 МПа.

Как и в случае постоянной температуры, при температурном перепаде наименьшую вероятность безотказной работы показал внутренний полиэтиленовый слой. Кроме того, в связи с тем, что за счет контакта с нагретой средой внутренний слой теряет жесткость, при этом в остальных слоях напряжения растут, что приводит к снижению вероятности их безотказной работы. Из рис. 2 следует, что вероятность безотказной работы, равная 95 %, обеспечивается при давлении 8,5 МПа.

Можно заметить, что о надежности конструкции в целом следует судить по наименее надежному слою. Однако в приведенном примере даже при достижении внутренним слоем предельного состояния разрушения не произойдет, так как его деформирование сдерживается средним армирующим и внешним полиэтиленовым слоями. Поэтому оценка надежности всей конструкции в каждом случае требует индивидуального подхода.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы по направлению фундаментальных исследований 23.1, а также при поддержке проекта РФФИ №16-48-70192_p_a.

Реутов А. И. Прогнозирование надежности строительных изделий из полимерных материалов: монография. – М. : ООО РИФ «Стройматериалы», 2007. – 184 с.

CELLULAR AUTOMATA SIMULATION OF RECRYSTALLIZATION AT HOT CRACK SURFACES

Moiseenko D.D.¹, Panin S.V.^{1,2}, Maksimov P.V.¹, Babich D.S.^{1,3},
Panin V.E.^{1,2} and Schmauder S.⁴

¹*Institute of Strength Physics and Materials Science, Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS),
Tomsk, 634055, Russia,*

²*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia,*

³*National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia,*

⁴*Institute for Materials Testing, Materials Science and Strength of Materials (IMWF), University of Stuttgart, Stuttgart,
70569, Germany*

The rapid development of aircraft and space technology and ever-increasing demands for equipment in the steel industry cause new problems for the design of materials and structures operating under extreme conditions. Among them are materials employed for manufacturing nozzles for jet engines, tuyeres and crystallizers of blast furnaces, etc. High temperature gradients and drops, powerful thermal impacts at engine start or melt filling into the crystallizer, etc., with regard of cyclic repetition of the processes, result in catastrophic degradation of the materials used.

In the current research, the authors propose a Hybrid discrete-continuum Cellular Automata approach (HCA) based on coupling the classical thermomechanics and the logics of CA-switching to simulate new phase generation and grain growth. On the basis of the HCA, numerical experiments on thermally activated recrystallization of pure titanium in the vicinity of crack edges were conducted. In doing so, 3D-cellular automaton simulates the behavior of the V-notched specimen region that imitates the crack tip vicinity. Numerical experiments are aimed at calculating heat expansion in the material under study through taking into account thermal stress accumulation and initiation of microrotations there. The latter gives rise to the generation of new defects and increases the local entropy. Every “newly-nucleated” grain has zero dislocation density; therefore, the gradient of the latter gives rise to an additional driving force for the growth of new grains (along with the formation of a thermal gradient).

The specimen was simulated by the cellular automata with an FCC (Face Centered Cubic) type of element packing, with a characteristic size of 1 μm . The specimen dimensions were $80 \times 120 \times 10 \mu\text{m}^3$. The initial temperature of each element was set at 300 K; the initial values of strains and stresses were equal to zero. The time step was set at 1 ns. In the numerical calculation, the material constants were taken typical for pure Ti. In all the numerical experiments, the inner surface of the notch was heated to a temperature of 1800 K.

It is shown that the material adjacent to the crack faces undergoes changes in its crystalline structure. The newly formed grains are nucleated at the crack faces to form, with the further growth, column-like patterns replacing the initial grain structure. This fact results in a significant local variation of all the mechanical properties of the material. A high temperature gradient gives rise to a characteristic columnar-like growth of the grains. The latter is directed from the region with elevated temperatures towards the cooler bulk material. Along with the nucleation and column-like growth of new grains within the bulk material, the growth of old ones takes place simultaneously. In the framework of the proposed approach, the thermal expansion of the material, which initiates the occurrence of thermal stresses, is simulated. The inhomogeneous field of thermal stresses generates the occurrence of local force moments becoming the source of crystal lattice curvature. Further, the lattice curvature is relaxed through microrotations giving rise to increasing defect density in the material.

It is shown that, in the most heated regions of the specimen, not only the nucleation of a new crystalline structure occurs, but also the fraction of the elastic torsion energy increase is very high. Under such conditions, the probability of twin-resembling structure nucleation is very high due to the deformation development by the torsion mechanism.

This study is a starting point for developing algorithms to simulate the deformation behavior of turbine blades containing fatigue cracks.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МЕТОДОВ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Пантелеев И.А., Савельева Н.В., Прохоров А.Е., Вшивков А.Н.

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: pia@icmm.ru*

Использование метода акустической эмиссии (АЭ) как неразрушающего метода контроля объектов, узлов, деталей, агрегатов в процессе их эксплуатации получило широкое распространение в самых разных областях промышленности. При этом для определения времени активного роста дефекта, его локализации, классификации по степени активности не требуется перехода от относительных единиц волновых форм импульсов акустической эмиссии (электрического сигнала) к абсолютным, отражающим количественные характеристики упругих волн в терминах перемещения, скорости или ускорения. Однако развитие методов обработки и интерпретации данных АЭ, базирующихся на физических механизмах явления акустической эмиссии (например метод восстановления компонент тензора сейсмического момента), требует оперирования абсолютными величинами регистрируемых сигналов. При реализации таких методов на первый план выходит задача абсолютной калибровки датчиков акустической эмиссии.

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу двух методов абсолютной калибровки датчиков акустической эмиссии, каждый из которых по типу является методом модельного источника. Для решения поставленной задачи разработан специализированный стенд для абсолютной калибровки датчиков акустической эмиссии, работающих в диапазоне 100–400 кГц, по методике, представленной в [1]. Стенд представляет собой столик из бронированного стекла толщиной около 30 мм, установленный на опоры через демпфирующую прокладку. Модельный источник одиночного импульса АЭ генерируется путем свободного падения металлического шара фиксированного диаметра 1,75 мм с заданной высоты. Калибруемый датчик фиксируется при помощи цианакрилатного клея на противоположной стороне столика напротив места падения шара. В результате проведенных калибровочных испытаний восьми различных датчиков АЭ (М-31, АЕ-401А) показано, что использование данной методики и разработанного стенда позволяют получить калибровочную кривую (переходную характеристику) датчика только в диапазоне частот до 250 кГц. Использование этой кривой обеспечивает в общем случае восстановление временной зависимости перемещения в точке установки датчика с приемлемой точностью (погрешность не превышает 9 %), однако накладывает ограничение на характер исходного измеренного сигнала, время нарастания его не должно существенно отличаться от времени нарастания сигнала, использованного для калибровки датчика.

Для верификации полученных калибровочных кривых проведена независимая калибровка восьми датчиков на базе ООО «ЛАЭС» (Тольяттинский государственный университет) с использованием генератора калиброванных акустических импульсов MSAE-USA-01. Преимуществами данного генератора являются широкий диапазон частот калибровки (10 кГц – 10 МГц) и отсутствие промежуточного звена (материала) между генератором и датчиком, а недостатком – определение только амплитудно-частотной характеристики передаточной функции (без фазово-частотной составляющей). Сравнение амплитудно-частотных характеристик передаточных функций, полученных двумя методами показало хорошее количественное совпадение для диапазона частот 10–250 кГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-41-590779-р_урал_а).

McLaskey Gregory C., Glaser Steven D. Acoustic emission sensor calibration for absolute source measurements // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2012. – Vol. 13. – P. 157–168. – DOI: 10.1007/s10921-012-0131-2.

ДВУХСТАДИЙНЫЙ МЕТОД УТОЧНЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛОСКОСТНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Пантелеев И.А.¹, Бельтюков Н.Л.², Паньков И.Л.², Костина А.А.¹

¹Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: pia@icmm.ru

²Горный институт Уральского отделения Российской академии наук,
78 а, ул. Сибирская, г. Пермь, 614007, Россия

Широко используемым методом локации источников акустической эмиссии (АЭ) является метод разницы времен прихода импульса на преобразователи акустической эмиссии. Применение этого метода для решения задачи локации источников АЭ в одно-, двух- и трехмерном случае показало его сильную чувствительность к исходным данным: координатам преобразователей акустической эмиссии, скорости звука в материале и временам вступления на каждом из датчиков АЭ. Поэтому задача разработки метода, повышающего точность решения задачи локации, в частности на плоскости, является актуальной, тем более в случае использования метода АЭ для контроля малогабаритных объектов.

Настоящая работа посвящена разработке метода уточнения решения задачи плоскостной локации источников акустической эмиссии в случае, когда координаты датчиков АЭ и скорость звука в материале заданы (определены) с некоторой погрешностью. Предлагается уточнять параметры (координаты и скорость) на этапе калибровки антенны, предназначенной для локации источников АЭ. На установленные на образец датчики поочередно подается калибровочный импульс, данные с оставшихся датчиков используются для решения задачи плоскостной локации. Далее уточнение решения задачи локации осуществляется в две стадии:

1. на первой стадии решается задача минимизации невязки между заданными координатами датчиков АЭ и вычисленными координатами для различного количества и комбинаций параметров, являющихся добавками к соответствующим координатам датчиков АЭ. В качестве результирующего набора параметров, корректирующих координаты расположения датчиков, выбирается набор, обеспечивающий минимальное значение невязки и имеющий минимальные абсолютные величины;

2. на второй ступени метода происходит корректировка скорости звука, позволяющей получить наиболее оптимальное приближение вычисленных координат датчиков АЭ к заданному набору.

Разработанный двухступенчатый метод уточнения координат в совокупности с дополнительным уточнением времен вступления Р-волн позволяет существенно поднять точность определения координат источников АЭ. Апробация разработанного двухстадийного метода проводилась на экспериментах по трех- и четырехточечному изгибу образцов мрамора. В результате апробация было показано, что предложенный метод позволяет существенно снизить погрешность определения координат источников акустической эмиссии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-00720-а).

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Калачев В.А.¹, Панфилов Г.П.¹, Кочанов А.Н.², Костандов Ю.А.³,
Зайцев Д.В.¹, Панфилов П.Е.¹

¹*Институт естественных наук, УрФУ,
51, пр. Ленина, 620083, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: peter.panfilov@urfu.ru*

²*Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, Москва,*

³*Крымский федеральный университет, Симферополь*

Известно, что жидкая среда способна влиять на механические свойства широкого круга материалов, включая горные породы. Если под влиянием жидкости происходит драматическое снижение напряжения, при котором начинается движение дислокаций в кристалле, то такой механизм можно описать эффектом Ребиндера. Особенности этого явления в горных породах можно изучать, наблюдая развитие трещин в лабораторных образцах, деформируемых в воде. Такие эксперименты могут позволить оценить вклад необратимой (пластической) деформации в аккомодацию механических напряжений. В качестве модельных материалов выбраны гранит, углистый кварцит, серпентинит, искусственный песчаник и каменный уголь (антрацит).

Образцы для испытаний изготавливали в форме дисков диаметром 6 мм и толщиной 3 мм. Механические испытания по схеме непрямого растяжения (бразильского теста) проводили при комнатной температуре на воздухе и в водопроводной воде на разрывной машине Shimadzu AG-50K XD (скорость перемещения траверсы 0,1 мм/мин). Испытание останавливали, когда на деформационной кривой возникал резкий изгиб, означающий появление в образце опасной трещины. Для каждого материала испытано две группы образцов по десять штук в каждой. Первую группу образцов испытывали на воздухе, а образцы второй группы – в водопроводной воде. Развитие трещин на поверхности образцов изучали при помощи оптических микроскопов, а морфологию изломов – при помощи сканирующего электронного микроскопа.

Характер хода деформационных кривых лабораторных образцов как при испытании на воздухе, так и в воде был одинаков для всех материалов. Во всех случаях деформация до начала разрушения была порядка 1 %. Поэтому можно заключить, что под действием растягивающей нагрузки образцы горных пород ведут себя как хрупкий материал независимо от среды испытания. Различие состояло в количественных характеристиках таких параметров как предел прочности и деформация до разрушения.

При нагружении на воздухе образцы серпентинита, гранита и песчаника на части не распадались, тогда как не менее половины образцов кварцита и антрацита распадались в процессе испытания. Это указывает на то, что при приложении растягивающей нагрузки в материале действуют два конкурирующих механизма аккомодации напряжений: зарождение-рост трещины и деформация (обратимая и необратимая). В серпентините и граните, которые, как плотные горные породы, не способны к макроскопической необратимой деформации, конкурирующим с разрушением каналом аккомодации напряжений будет обратимая деформация на микроскопическом уровне. В то время как в каменном угле, из-за его высокой пористости, игнорировать вклад макроскопической необратимой деформации в релаксацию приложенных напряжений нельзя, поскольку при нагружении часть пор может схлопываться.

Несмотря на то что после выдержки образцов в воде предел прочности и деформация до разрушения снизились, только половина образцов каменного угля распалась на части в процессе испытания, в то время как образцы остальных горных пород оставались целыми. Это означает, что в серпентините и граните продолжают действовать оба механизма аккомодации напряжений – растрескивание и обратимая деформация, тогда как каменном угле с зарождением и развитием трещин начинает конкурировать необратимая деформация.

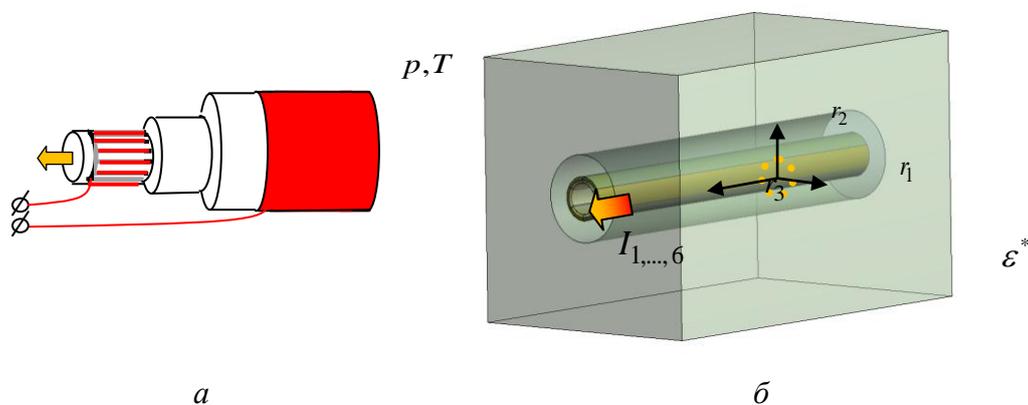
Исследование трещин на макроскопическом уровне показало, что траектория движения магистральной трещины определяется геометрией приложения нагрузки и не зависит от среды испытания и материала образца. Длина же магистральной трещины зависит от среды испытания. В образцах, испытанных на воздухе, она сравнима с диаметром, а в испытанных в воде – была заметно меньше. При изучении трещин на микроскопическом уровне было обнаружено, что магистральная трещина состоит из мелких трещин линзообразной формы, имеющих тенденцию к слиянию. Ширина трещин в «сухих» образцах была в два-три раза больше, чем в «мокрых». Если на пути магистральной трещины встречалось включение, то это могло приводить к отклонению трещины от первоначальной траектории.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ОПТОВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Паньков А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: a_a_pankov@mail.ru

Разработаны новые конструкции пьезоэлектр люминесцентных оптоволоконных датчиков [1, 2] для уточненного диагностирования распределения давления p и/или температуры T (рисунок *а*) [1] и сложного объемного напряженно-деформированного состояния ε^* (рисунок *б*) [2] внутри композитных конструкций по результатам обработки приемником-анализатором интенсивностей I интегральных оптических сигналов на выходе из оптоволоконна датчика. Датчики (рисунок) представляют собой оптоволоконно 1 с коаксиальными электролюминесцентным 2 и пьезоэлектрическим 3 слоями; оптоволоконно и электролюминесцентный слой разделены внутренним фотопрозрачным или перфорированным управляющим электродом 4, на поверхности пьезоэлектрического слоя расположен внешний управляющий электрод 5. Информативные световые сигналы возникают на локальных участках измерительных элементов датчика в силу механолюминесцентного эффекта, обусловленного взаимодействием пьезоэлектрического и электролюминесцентного элементов датчика, и передаются по оптоволоконну к приемнику-анализатору; управляющее напряжение $U_{упр}$ на электродах позволяет диагностировать локации (по длине датчика) неоднородностей давления, температурных и деформационных полей в композитных конструкциях.



Датчики давления и/или температуры (*а*) и объемного напряженного состояния (*б*)

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00722).

Литература

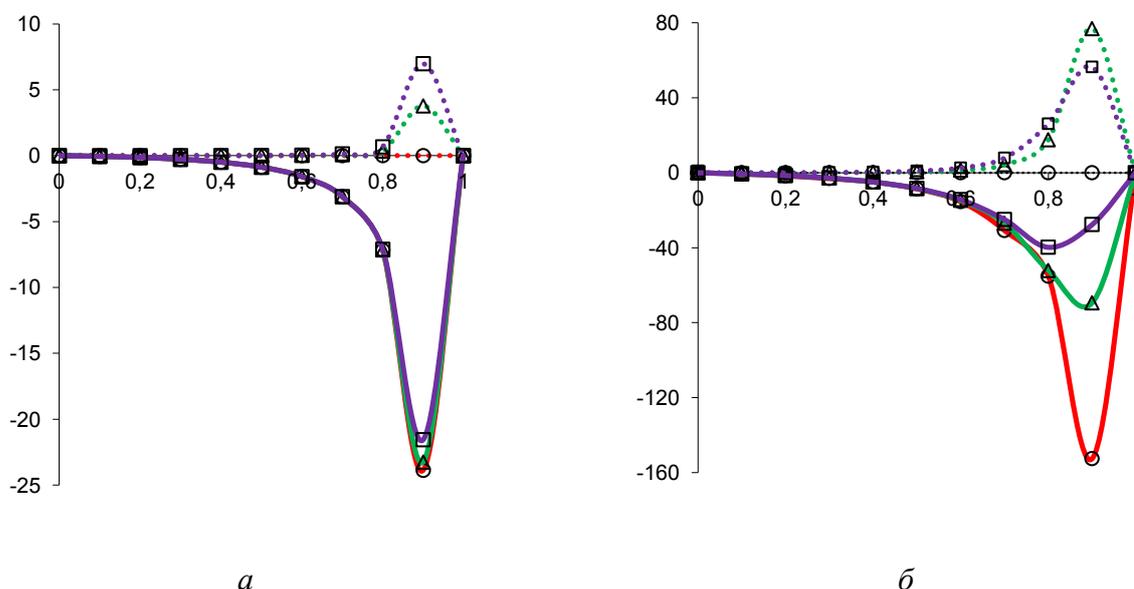
1. Волоконно-оптический датчик давления : пат. 2630537 Рос. Федерация / Паньков А. А. – № 2016136058 ; заявл. 06.09.2016 ; опубл. [11.09.2017](#).
2. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния: пат. 2643692 Рос. Федерация / Паньков А. А. – № 2017111405 ; заявл. 04.04.2017 ; опубл. [05.02.2018](#).

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДВУХУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРО МАГНИТО ТЕРМОУПРУГОСТИ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ

Паньков А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: a_a_pankov@mail.ru

Представлены результаты численного расчета действительной и мнимой частей эффективного продольного коэффициента электромагнитной связанности $\kappa_{33}^* = \kappa'_{33} + i\kappa''_{33}$ композита PVDF/феррит со слоистой структурой (рисунок а) и со сферическими полидисперсными включениями (рисунок б) в зависимости от величины наполнения ν_1 и круговой частоты ω внешнего электрического поля [1, 2].



Зависимости действительной (сплошная линия) и мнимой (штриховая линия) частей коэффициента магнитоэлектрической связанности κ_{33}^* композита PVDF/феррит от объемной доли ν_1 ферритовых слоев (а), сферических включений (б) при круговой частоте электрического поля $\omega = 1 \text{ c}^{-1}$ (\circ); 500 c^{-1} (\triangle); 1000 c^{-1} (\square)

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00722).

Литература

1. Паньков А. А. Коэффициенты электромагнитной связи композита с пьезоактивными фазами // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 2. – С. 93–99.
2. Pan'kov A. A. Pyroelectromagnetic effects of a piezocomposite in the binary refinement of the method of quasi-periodic polydisperse correlation components // Mechanics of Composite Materials. – 2016. – Vol. 52, no. 4. – P. 535–544.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ДОСТОВЕРНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕТОДОМ МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

Аношкин А.Н., Осокин В.М., Пеленев К.А., Третьяков А.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, пр. Комсомольский, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: osokin-kt@pstu.ru ,kpelenev@yandex.ru, tretyakov-kt@pstu.ru*

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) активно внедряются в производство высоконагруженных деталей и узлов авиационной техники. Это обусловлено значительно меньшей массой конструкции, по сравнению с металлическими аналогами, что в свою очередь обеспечивает снижение массы, повышение топливной эффективности.

Авиационные детали и узлы имеют, как правило, сложную геометрию и технологию изготовления, они подвержены широкому спектру динамических нагрузок в течение длительного периода эксплуатации. При этом в процессе эксплуатации неизбежно накапливаются повреждения, включающие в себя расслоения, разрыв волокон, разрушение матрицы, снижение прочности и жесткости при повышенных температурах, концентрация напряжений, вследствие чего, в конструкции неизбежно накапливаются микрповреждения, для обнаружения которых необходимо проводить периодическую диагностику состояния деталей и узлов неразрушающими методами контроля. Основная цель данной диагностики – обнаружение малых повреждений, прежде чем они станут критическими из-за возрастания их количества и соединения с другими поврежденными участками.

Одним из перспективных направлений обнаружения внутренних дефектов в настоящее время является метод микрофокусной рентгенографии. Однако применение метода для слоистых композиционных материалов не всегда эффективно, особенно если речь идет о дефектах типа расслоения. Чаще всего в подобных дефектах наблюдается эффект «схлопывания», т. е. отсутствие раскрытия после снятия нагрузки с изделия. Для обнаружения таких дефектов методом рентгенографии необходимо приложить механическое воздействия к объекту исследования для раскрытия уже существующей трещины, но не приведет к образованию новых и дальнейшему росту имеющихся дефектов.

Объектом исследования в настоящей работе является конструктивно-подобный элемент кольцевого шпангоута П-образного сечения, выполненный по технологии пропитки смолой под давлением (RTM) сухих слоев углеродной ткани, выложенных в специальную формообразующую оснастку. Экспериментально было показано, что такая деталь при воздействии эксплуатационных (или им подобных) нагрузок разрушается по типу расслоения в угловой зоне, без разрыва волокон слоев с сохранением несущей способности от максимальной нагрузки на уровне 30 %. После снятия нагрузки межслоевые трещины «смыкаются», что не позволяет провести их идентификацию средствами неразрушающего контроля. На рис. 1 представлен образец после проведения механических испытаний.

Для проведения исследований по определению оптимального механического воздействия на объект разработана трехмерная компьютерная модель композитного конструктивно-подобного элемента П-образного профиля (рис. 2).

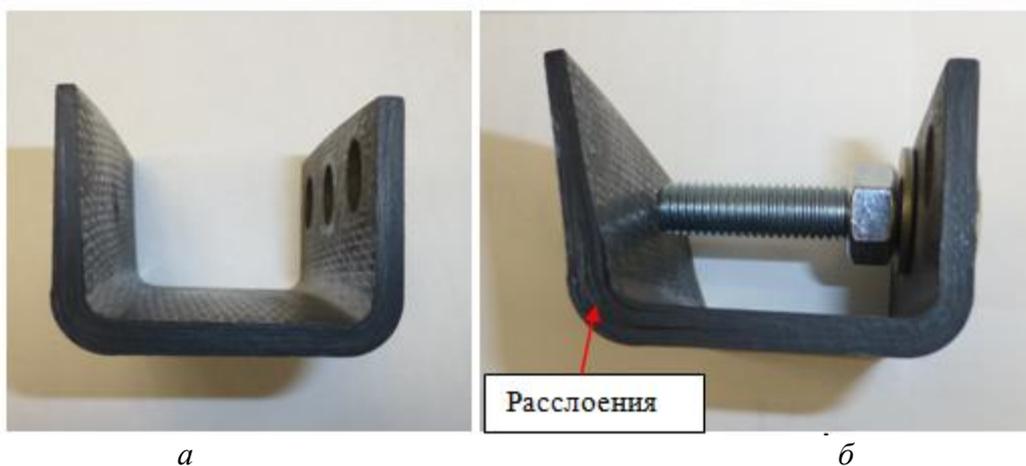


Рис. 1. Композитный конструктивно-подобный элемент шпангоута после механических испытаний в исходном (а) и принудительно-нагруженном состоянии (б)

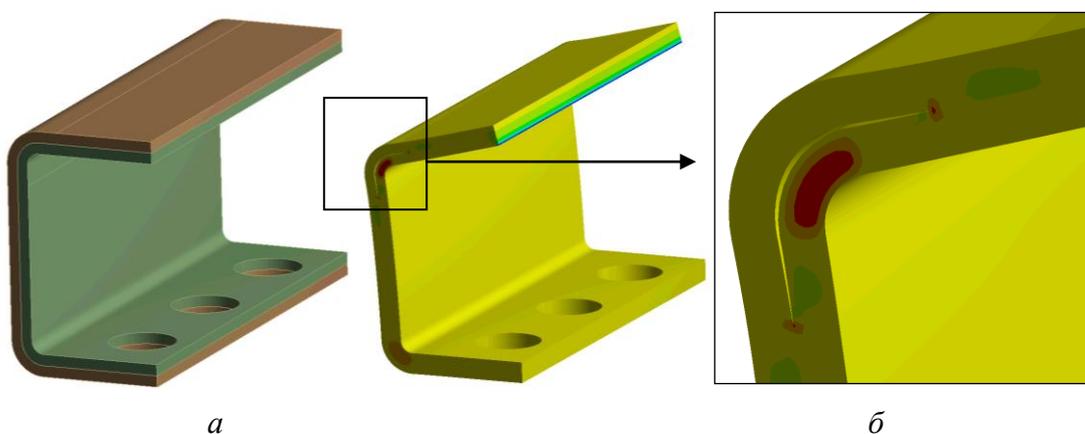


Рис. 2. Трехмерная компьютерная модель композитного конструктивно-подобного элемента шпангоута с расслоением в ненагруженном (а) и нагруженном состоянии (б)

Модель выполнена с явным описанием слоистой структуры и включением дефекта типа расслоение, характер и местоположение которого были получены в процессе предварительного проведения механических испытаний. Рассматривалось несколько вариантов возможного размера и расположения дефекта по толщине слоистого пакета в зоне перегиба. Моделирование расслоений выполнялось посредством изменения параметров контактного взаимодействия на локальных участках заданных размеров.

Решение задачи осуществлялось методом конечных элементов (МКЭ) в пакете ANSYS Workbench. По результатам анализа напряженно-деформированного состояния проводилась оценка необходимой величины нагрузки и места ее приложения для обеспечения раскрытия трещины, достаточного для применения рентгенографического метода неразрушающего контроля.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00155).

ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕДЛЕННЫХ ВОЛН ДЕФОРМАЦИИ В УПРУГО-ПЛАСТИЧНЫХ СРЕДАХ

Макаров П.В., Перышкин А.Ю.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: pvm@ispms.tsc.ru, alex700@yandex.ru*

Экспериментально установлено, что при нагружении твердых тел, в частности металлов, в них возможна генерация медленных деформационных фронтов, скорости которых лежат в диапазоне 10^{-4} – 10^{-5} м/с, что на 7–8 порядков меньше скоростей волн напряжений, распространяющихся со скоростью звука.

Подобные медленные деформационные фронты трактуются как автоволновые процессы [1, 2].

Эти автоволновые процессы достаточно хорошо изучены экспериментально при нагружении металлических образцов с различными кристаллическими решетками. Подобные результаты получены также при нагружении хрупких горных пород.

В металлах характер распространения автоволн деформации надежно связывают со стадийностью неупругого течения на σ - ε диаграмме. На площадке текучести распространяется 1–2 фронта как волны переключения. На стадии линейного упрочнения в образцах фиксируется множество достаточно узких фронтов локализованной деформации, распространяющихся с одинаковой скоростью. На стадии параболического упрочнения эти фронты практически неподвижны и на заключительной стадии деформирования деформационные фронты стекаются в область будущего разрушения. Это позволяет экспериментально спрогнозировать место и время разрушения [2].

В работе двумя методами выполнено численное моделирование медленных автоволновых деформационных процессов в металлах и в горных породах. Изучены особенности их генерации, распространения, взаимодействия и их вклад в формирование очага будущего разрушения.

В настоящее время концепция медленных деформационных фронтов широко дискутируется в контексте катастрофических разрушений элементов земной коры при землетрясениях. Считается, что они как активно участвуют в формировании очагов разрушения, так и могут являться триггерами землетрясений

В первой модели применен комбинированный подход, объединяющий уравнения МДТТ и метод клеточных автоматов, задающий правила перевода расчетных ячеек из упругого состояния в неупругое. В ряде случаев деформационные волны ведут себя подобно солитонам, проникая друг через друга. Они проходят несколько раз по образцу и формируют в итоге шейку при растяжении металлических образцов и зону сдвига при сжатии геоматериалов.

Во второй модели в среде явно задается релаксация напряжений от верхнего предела текучести к нижнему, площадка текучести и линейное упрочнение. В этом случае ярко выражен автоволновой характер медленных деформационных возмущений. Показано, что они распространяются по образцу как волны переключений.

Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.

Литература

1. Макаров П.В., Перышкин А.Ю. Моделирование «медленных движений» – автоволн неупругой деформации в пластичных и хрупких материалах и средах // Физическая мезомеханика. 2016. – Т19. – №2. – с. 30–46.
2. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. – Новосибирск: Наука, 2008. – 328 с.

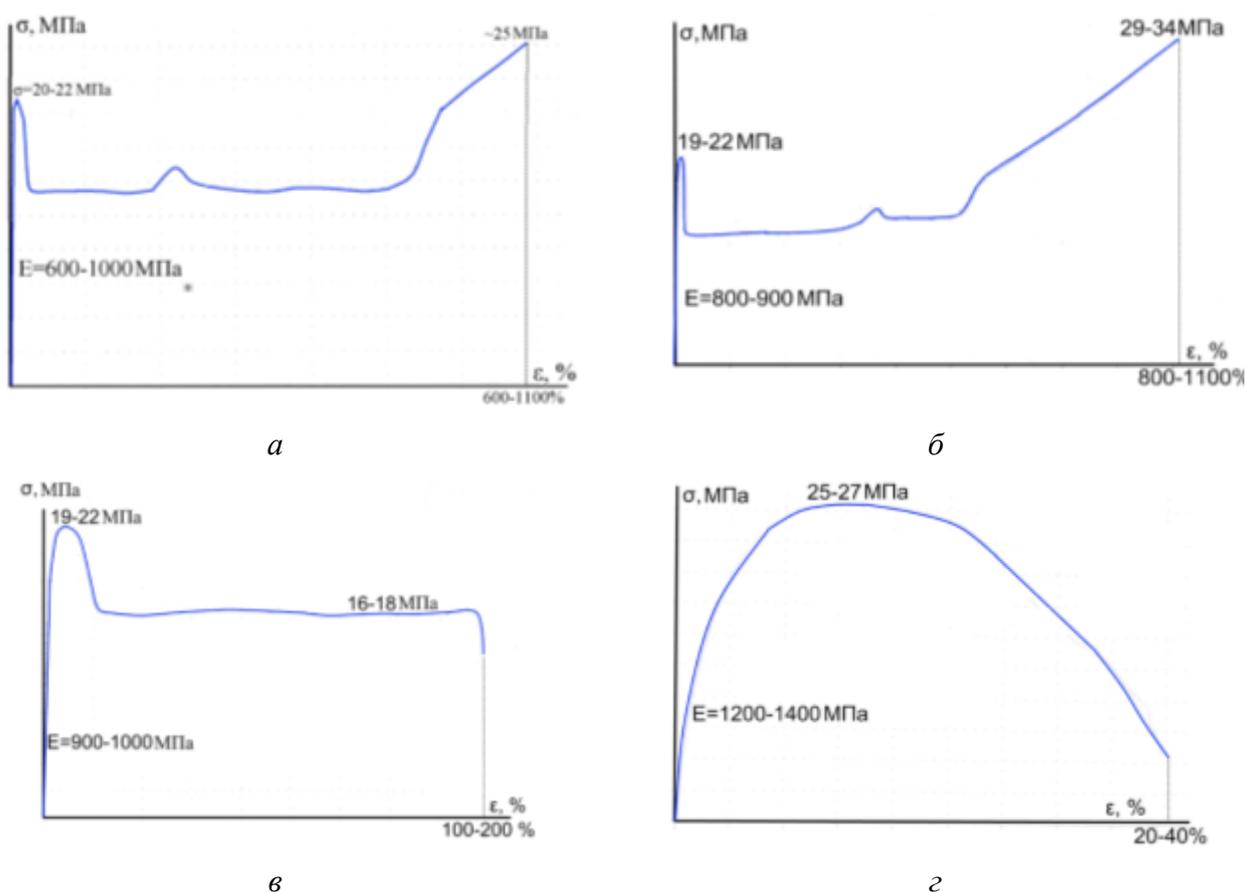
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ НАНО- И ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Петухова Е.С.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677890, Россия, г. Якутск,
д. 1, ул. Октябрьская, Российская Федерация,
e-mail: evgspar@rambler.ru

Известно [1], что влияние наполнителей на деформационно-прочностные характеристики композитов определяется особенностями взаимодействия между частицами добавок и полимером. Наполнители адсорбируют макромолекулы полимера на своей поверхности, снижая их подвижность. При этом наблюдается рост сопротивляемости композита разрушающему воздействию, сопровождающийся ростом жесткости, предела текучести и снижением деформационных характеристик. С другой стороны, некоторые наполнители активно влияют на надмолекулярную структуру полимеров, способствуют формированию более высокоорганизованных образований, вызывая более активное «течение» полимера при растяжении, что приводит к росту его деформационных характеристик.

В работе были сопоставлены результаты исследования физико-механических характеристик [2, 3] и особенностей структуры nano- и дисперсно-армированных полиэтиленовых композитов трубного назначения (рисунок).



Характерные кривые напряжение-деформация полиэтиленовых композитов различного состава: *a* – ПЭ2НТ11; *б* – ПЭ2НТ11 + нанонаполнители (шпинель магния, природные цеолиты, углеродные нановолокна); *в* – ПЭ2НТ11 + БВ, поверхностно-модифицированные БВ; *г* – ПЭ2НТ11 + УВ марки УКН-М, «Белум», поверхностно-модифицированные УКН-М

Исследования показали, что ход кривых напряжение-деформация исходного полимера и нанокompозитов на его основе практически идентичен (рисунок *а, б*). Однако, при определенном соотношении компонентов можно получить материалы, прочность при разрыве которых будет до 30 % выше, чем у исходного полимера, что обусловлено эффектом «раскручивания» более крупных надмолекулярных образований, сформированных с участием наночастиц.

Установлено, что взаимодействие компонентов в композитах с базальтовыми волокнами (БВ) в том числе с поверхностно-модифицированными, путем наращивания на их поверхности углеродных нановолокон, определяется лишь механическим охватом волокна полимером – адгезионных взаимодействий в системе не выявлено. Такие композиты характеризуются невысокими значениями удлинения при разрыве, в остальном ход кривой совпадает с ненаполненными материалами (рисунок *в*), т. е. механические свойства таких материалов определяются свойствами матрицы, а волокнистый наполнитель нарушает сплошность материала, вызывая его преждевременное разрушение.

Развитый переходный слой между волокном и полимером возможно получить при использовании волокон с такими характеристиками поверхности как высокая рельефность, наличие прочно-закрепленного модифицирующего слоя, наличие покрытия, обеспечивающего лучшее смачивание поверхности волокна расплавом полимера [3]. Такими характеристиками обладали углеродные волокна (УВ) марок УКН-М, «Белум», а также УВ, на поверхности которых наращены углеродные нановолокна. Величина предела текучести и модуля упругости таких композитов до 40 % и в 2 раза выше соответственно, а деформационные характеристики существенно ниже базовой марки ПЭ. Полученные закономерности обусловлены снижением конформативной подвижности адсорбированных на поверхности наполнителя макромолекул и возможностей перемещения макромолекул относительно друг друга.

Таким образом, нанонаполнители обеспечивают трансформацию надмолекулярной структуры ПЭ, сопровождающуюся ростом эластичности полимера и его прочности при разрыве, а эффективность волокнистых наполнителей определяется поверхностными характеристиками волокон.

Работа выполнена в рамках Госзаказа ФАНО РФ (проект № АААА-А17-117040710038-8 от 07.04.2017 г.).

Литература

1. Капитонов А. М., Редькин В. Е. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства : монография. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 533 с. – ISBN 978-5-7638-2750-7.
2. Petukhova E. S., Gogleva O. V. Investigation of polyethylene nanocomposites for pipes // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1915. – P. 030018. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5017338>
3. Petukhova E. S., Krasnikova I. V. The effect of surface nanostructuring behavior of a fiber-reinforced polyethylene composite // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785. – P. 030021. – DOI: 10.1063/1.4967042. – URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4967042>

ЧИСЛЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ ПКМ

Аношкин А.Н., Писарев П.В., Ермаков Д.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский пр-т, Пермь, 614990, Россия,
e-mail: pisarev85@live.ru, den032895@yandex.ru*

Для прогнозирования остаточного ресурса многослойной конструкций из ПКМ, в рамках настоящего исследования, был разработан алгоритм. Данный алгоритм основан на методе конечных элементов с использованием кинетических уравнений со скалярной функцией поврежденности. В соответствии с ним конструкция разбивается на конечные элементы, содержащие несколько клеевых и силовых слоев. Внешняя нагрузка полагается циклически изменяющейся по гармоническому закону.

Усталостное разрушение моделировалось в виде разрушения связующего в клеевых слоях [1]. Таким образом, моделировалось развитие повреждения типа «расслоение», которое является типичным и характерным видом разрушения данных конструкций как при эксплуатационной нагрузке, так и при лабораторных испытаниях. Зависимость прочности связующего от уровня циклических нагрузок принималась по известным в литературе экспериментальным данным. Предварительная оценка ресурса работы проводилась по критерию наислабейшего звена.

Задача расчета НДС рассматриваемой конструкции для максимальной (амплитудной) нагрузки в цикле с учетом накопления повреждений и разрушений решалась в итерационном цикле по шагам. Для всех элементов клеевых слоев определялось и текущее значение поврежденности, которое позволяло определить место, и количество циклов наработки до следующего разрушения. В рассмотренном варианте механические свойства материала клеевого слоя не зависели от уровня поврежденности до момента достижения поврежденности критического значения = 1. После достижения этого значения в каком-либо конечном элементе считалось, что произошло дисперсное разрушение материала, и механические свойства в этом элементе редуцировались до пренебрежимо малых значений, после чего производился расчет конструкции с измененными свойствами в этом разрушенном конечном элементе. Таким образом, на каждом шаге алгоритма моделировалось усталостное повреждение конструкции.

Численное прогнозирование ресурса многослойной конструкции из ПКМ проводилось в программном комплексе ANSYS Mechanical с интегрированной авторской программой. Проведено исследование влияния дефекта в виде расслоения на кинетику разрушения многослойной конструкции. Определены области начала усталостного разрушения для бездефектной модели и модели с дефектом.

По результатам численного расчета было получено описание процессов накопления повреждений и разрушения в структуре рассматриваемой конструкции при циклическом нагружении. Выявлено, что для фланца без дефекта разрушение при циклическом нагружении прогнозируется после $2,819 \cdot 10^8$ циклов нагружения, предполагаемое место разрушения – клеевой слой в районе закрепления. Для фланца с дефектом разрушение прогнозируется после $1,108 \cdot 10^8$ циклов нагружения в центральном, вертикальном клеевом слое в районе дефекта. Таким образом, ресурс бездефектного фланца приблизительно в 2,54 раза больше, чем фланца с дефектом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-48-590129 [p_a](#))

In-situ microfocus X-ray monitoring of damage accumulation in composite bulkhead under loading / A. N. Anoshkin, V. Yu. Zuiko, V. M. Osokin, P. V. Pisarev // ECCM : proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials. – 2016.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ВЕРШИНЕ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В МЕТАЛЛАХ

Плехов О.А., Изюмова А. Ю., Вшивков А.Н.

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Россия, e-mail: poa@icmm.ru

В начале 60-х гг. прошлого века был предложен степенной закон, связывающий амплитуду коэффициента интенсивности напряжения (КИН) и скорость распространения усталостных трещин в металлах. Несмотря на наличие зоны пластической деформации в вершине трещины, делающей неочевидной возможность использования величины КИН для характеристики процесса разрушения в вершине трещины, данный закон эффективно используется в большом количестве практических приложений.

Большое число модификаций закона Париса вводят в рассмотрение дополнительные структурные или энергетические параметры для описания процесса распространения усталостных трещин. Среди них можно отметить модели, использующие введение эффективного КИН, учитывающие эффект закрытия трещин; усложняющие степенную зависимость скорости распространения от амплитуды КИН, например, закон Формана; вводящий в рассмотрение фрактальные характеристики поверхности трещины; учитывающие характерный размер зоны пластической деформации или энергию пластической деформации.

С физической точки зрения определяющим для процесса распространения трещины является баланс энергии в ее вершине. Одним из эффективных методов исследования баланса энергии в вершине трещины является инфракрасная термография. Для уточнения измеряемых энергетических характеристик процесса деформирования металлов авторами ранее был предложен контактный метод измерения потоков тепла [1]. В результате были получены корреляции между скоростью распространения усталостных трещин и мощностью диссипации энергии в их вершине. Наряду с этим было показано, что при проведении эксперимента с постоянным значением коэффициента интенсивности напряжений (постоянной скоростью усталостной трещины) диссипация энергии в ее вершине монотонно уменьшается [2].

В продолжение данной работы были проведены исследования особенностей деформирования материала и диссипации энергии в вершине трещины при сложном нагружении. Получены новые экспериментальные результаты о распределении деформации в вершине трещины для различных степеней двуосности нагружения с микронным разрешением. Подтверждены выводы авторов о существовании двух режимов диссипации энергии в процессе стабильного роста трещины, соответствующих ее разным скоростям.

Для анализа упругопластических деформаций в вершине трещины были получены аппроксимационные соотношения для работы пластической деформации в зонах циклической и монотонной пластических деформаций. Было показано, что мощность диссипации энергии в циклической зоне пластической деформации не зависит от скорости движения усталостной трещины и определяется только размахом приложенного напряжения. Линейная связь между скоростью диссипации энергии и скоростью усталостной трещины целиком определяется скоростью диссипации энергии в монотонной зоне пластической деформации. Полученные аппроксимации позволили предложить объяснение особенностей диссипации энергии при распространении усталостных трещин для различных условий нагружения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-51-48003 ИНД_оми.

Литература

1. Vshivkov A., Iziumova A., Plekhov O., Вдр J. Experimental study of heat dissipation at the crack tip during fatigue crack propagation // Fracture and structural integrity 35 (2016) 131–137.
2. Вдр J., Vshivkov A., Plekhov O. Combined Lock-In Thermography and Heat Flow Measurements for Analysing Heat Dissipation during Fatigue Crack Propagation // Fracture and structural integrity 34 (2015) 521–530.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ИНВАРНАЯ АНОМАЛИЯ В МНОГОСЛОЙНОМ СТАЛЬНОМ МАТЕРИАЛЕ

Сафонов М.Д., Плохих А.И.

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный Исследовательский Университет); (МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

д. 5 стр. 1, ул. 2-я Бауманская, г. Москва, 105005, Российская Федерация, e-mail: plokhikh@bmstu.ru

Анализ результатов многочисленных исследований показывает, что инварный эффект является многогранным, достаточно часто встречающимся в природе явлением. Наряду с классическими инварами похожие аномалии были обнаружены в ряде цветных сплавов на основе титана и меди, при условии протекания в них мартенситного превращения. Другой подход в этом направлении основан на результате взаимодействия локальных микроскопических полей упругих напряжений в композиционных материалах. В соответствии с существующей математической моделью инварная аномалия может наблюдаться в композитах со слоистым строением, созданных на основе бинарных композиций металлов. Основным критерием при выборе материалов для композиций, является значительная разница в модуле нормальной упругости, значениях ТКЛР и коэффициенте Пуассона [1]. Однако учитывая, что получение компактных композитов на основе столь разнородных материалов является технически сложной задачей, актуальной является проверка адекватности упрощенной модели с использованием доступных и технологичных материалов, например на основе сталей, с отличающимися значениями ТКЛР.

В соответствии с разработанной технологией получения многослойных металлических материалов [2] были изготовлены объекты исследования на основе сталей 08X18H10 и 08кп. Образцы были вырезаны из горячекатаной полосы толщиной 10 мм в трех направлениях: вдоль направления проката (RD), в плоскости проката (TD) и в направлении, перпендикулярном плоскости проката (ND). Объекты исследования имели разную степень структуризации – после первого технологического цикла это были стослойные образцы, которые имели толщину единичного слоя, равную 100 мкм, а после второго цикла, когда количество слоев составляло около 1500 шт., толщина единичного слоя в образце не превышала 5 мкм.

Проведенное дилатометрическое исследование показало, что исследуемый многослойный материал имеет аномалию теплового расширения ($\Delta L/L$) в направлении перпендикулярном к плоскости проката ND в интервале температур $\alpha \rightarrow \gamma$ перехода стали 08кп. Наряду с этим в плоскости этого же многослойного материала, в направлениях RD и TD, ход дилатометрических кривых с незначительными отклонениями совпадает с трендом термического расширения стали 08X18H10. Обнаруженный эффект может быть объяснен тем, что $\alpha \rightarrow \gamma$ переход в стали 08кп происходит с уменьшением параметров кристаллической решетки и усиление этого сжатия связано с наложением сжимающих напряжений со стороны расширяющихся слоев стали 08X18H10. При этом такое же сильное действие, но уже растягивающего свойства со стороны слоев стали 08X18H10, напряжения оказывают на слои стали 08кп в направлениях RD и TD, что вызывает практически полную компенсацию сжатия.

Таким образом, действительно, формирование многослойной структуры способно оказать влияние на значения ТКЛР в направлении ND при нагреве. Однако уменьшение абсолютных значений коэффициента до инварных обусловлено благоприятным сочетанием условий, а именно – совпадением знака сжимающих напряжений стали 08X18H10 с направлением изменения параметров решетки стали 08кп при $\alpha \rightarrow \gamma$ превращении.

Литература

1. Колпаков А. Г., Ракин С. И. К задаче синтеза композиционного материала одномерного строения с заданными характеристиками // Прикладная механика и техническая физика. – 1986. – № 6. – С. 143–150.
2. Колесников А. Г., Плохих А. И., Михальцевич И. Ю. Исследование возможности получения субмикро- и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки // Производство проката. – 2010. – № 3. – С. 25–31.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

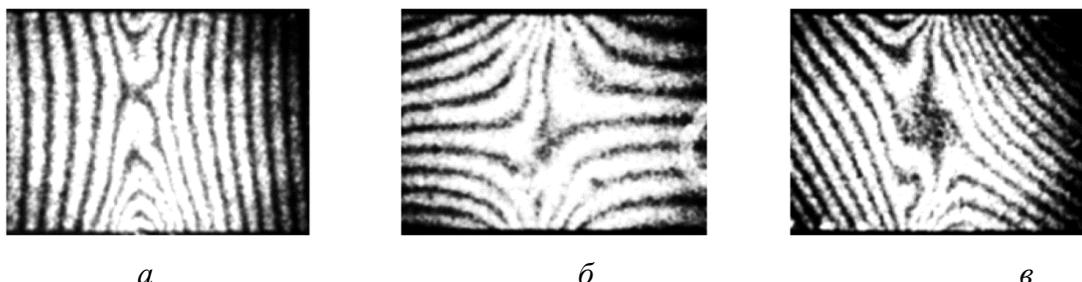
Одинцев И.Н., Плугатарь Т.П.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
4, Малый Харитоньевский пер., 101990, Москва, Российская Федерация,
e-mail: tplugatar@gmail.com*

Механическое поведение материалов и элементов конструкций во многом зависит от наличия в них остаточных напряжений, суммируемых с напряжениями от рабочих нагрузок. В сложных телах, состоящих из разнородных частей с различными коэффициентами термического расширения, остаточные напряжения являются следствием каких-либо вариаций температуры, в том числе по технологическим условиям. В частности, этот эффект наглядно проявляется при создании полимерных слоистых композитов в ходе охлаждения заготовки от температуры формирования. Дополнительный вклад вносит термохимическая усадка полимерных составляющих. В итоге возникают как внутрислойные микронапряжения на границах волокон и связующего, так и мезонапряжения, действующие в масштабе отдельных разнонаправленных слоев и, в общем случае, существенно изменяющиеся по толщине пакета.

Цель работы – усовершенствование методики экспериментального исследования распределений напряжений по толщине многослойного композита, базирующейся на создании и наращивании по глубине узкого поперечного паза-канавки в образце в виде стержня с прямоугольным поперечным сечением.

Отличие разработанной методики от ее предшествующих аналогов состоит в иной форме регистрируемого деформационного отклика образца, обусловленного удалением напряженного материала, а также в выборе средства его измерения. В предложенном подходе после каждого шага углубления паза определяются жесткие взаимные пространственные развороты (продольный и поперечный) консольных частей образца, что в метрологическом аспекте является более предпочтительным по сравнению с измерением (как ранее) локальных значений высокоградиентного поля деформаций. Наиболее эффективным инструментом для регистрации указанных разворотов являются бесконтактные оптико-корреляционные методы – спекл-интерферометрия или корреляция цифровых изображений. В качестве иллюстрации на рисунке представлены типичные спекл-интерферограммы полей нормальных перемещений в образце на противоположной от углубляемого паза поверхности.



Спекл-интерферограммы полей нормальных перемещений в образце на противоположной от углубляемого паза поверхности в случаях продольного (а), поперечного (б) и смешанного (в) разворота консольных частей. (Цена полосы на данных картинах составляет 0,3 мкм.)

Процедура обработки полного массива исходных данных базируется, как и в традиционном варианте, на использовании набора коэффициентов влияния, которые здесь представляют собой значения пространственных разворотов консольных частей образца при действии единичных напряжений (касательных или нормальных) на образующихся в результате пошагового удаления слоев свободных поверхностях. Предварительный расчет коэффициентов выполняется с помощью метода конечных элементов.

Изложенная методика апробирована в ряде экспериментов по исследованию остаточных напряжений в полимер-углеродных слоистых композитах с различной ориентацией монослоев.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-58-53020.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ФЕРРОМАГНИТНОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ РАЗМЕРОВ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА И ВЕЛИЧИНЫ НЕФЕРРОМАГНИТНОГО ЗАЗОРА

Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М.

*ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: us@imach.uran.ru*

Магнитные методы для оценки структурного состояния, определения прочностных характеристик и анализа фазового состава изделий из ферромагнитных материалов, основанные на измерении их магнитных характеристик, все более широко используются для диагностики текущего состояния деталей машин и элементов конструкций. Измерения магнитных характеристик в этих целях чаще всего производят с помощью приставных магнитных устройств (ПМУ). При этом остаются актуальными проблемы оптимизации размеров ПМУ и учет влияния неконтролируемого неферромагнитного зазора случайной величины между полюсами ПМУ и поверхностью контролируемого объекта. Для решения этих задач важно знать распределение магнитного потока в поверхностных и внутренних слоях контролируемых изделий, а также глубину проникновения магнитного потока.

В работе экспериментально исследовано пространственное распределение магнитных потоков в массивном стальном образце при локальном намагничивании его приставными П-образными электромагнитами различных размеров, а также при наличии в составной цепи «ПМУ – образец» неферромагнитного зазора под одним или обоими полюсами ПМУ.

Эксперименты проведены с помощью специальной разработанной методики исследования топографии магнитных потоков в ферромагнетике при намагничивании его приставными электромагнитами. Объект исследования – массивный стальной образец стали 40Х, размеры которого существенно превышают размеры используемых ПМУ.

Установлены закономерности, связывающие распределение магнитного потока в ферромагнитном материале с геометрическими размерами приставных электромагнитов и величиной неферромагнитных зазоров в составной цепи «ПМУ – объект контроля» под одним или обоими полюсами ПМУ.

Результаты настоящего исследования могут быть полезны в магнитной дефектоскопии при выборе наиболее целесообразного расположения измерительных преобразователей в пространстве между полюсами электромагнита, в магнитном структурном анализе для регулирования глубины промагничивания контролируемого изделия, а также для проверки адекватности численного моделирования процессов намагничивания и перемагничивания изделий из стали 40Х.

Работа выполнена в рамках темы гос. задания № 0391-2016-0005 и проектов Комплексной программы УрО РАН № 18-9-1-20 и № 18-10-1-40.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАКТИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СТРУКТУРУ СТАЛЬНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Поликевич К.Б., Путырский С.В., Сафонов М.Д., Плохих А.И.

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный Исследовательский Университет); (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
д. 5 стр. 1, ул. 2-я Бауманская, г. Москва, 105005, Российская Федерация,
e-mail: plokhikh@bmstu.ru*

Весьма эффективным при создании перспективных образцов техники является использование нетрадиционных материалов, характерной особенностью которых является наличие ориентированной анизотропной структуры. К числу таких материалов можно отнести конструкционные металлические материалы, получаемые на основе синтеза многослойных композитных заготовок горячей пакетной прокаткой. Вместе с тем получение подобных материалов является задачей достаточно сложной, ввиду того, что требуется учет многих факторов, влияющих на процесс как формирования, так и наследования многослойной структуры на разных этапах изготовления.

Одним из главных условий, позволяющих наследовать исходное строение первичной заготовки при повторении технологических циклов, является предотвращение структурной перекристаллизации на межслойных границах. В отличие от традиционных би-, три- и других металлов, для которых образование общих зерен на границах раздела приветствуется, в материалах с ламинарным строением это является недопустимым. Нарушение в регулярном расположении слоев вследствие исчезновения высокоугловой разориентировки между ними делает невозможным в дальнейшем утонение слоев прокаткой при повторении технологических циклов. К основным факторам, дестабилизирующим межслойную границу при нагреве, необходимо отнести реактивные напряжения, возникающие вследствие разницы ТКЛР, а также сравнительный уровень прочностных и пластических характеристик сплавов, который определяет релаксационную способность пары в целом.

Для анализа была использована конечно-элементная модель, которая была создана с помощью модуля LS-Dyna Export программного комплекса ANSYS, с граничными условиями, заданными в программе LS-PrePost. Выполнение расчета проводилось на пятислойной модели, составленной из сталей 08X18H10 и У8. Неразрывная связь и отсутствие проскальзывания между слоями обеспечивались за счет создания общих узлов на границе соседних слоев. Поскольку достоверно определить прочностные характеристики отдельных слоев в составе многослойного материала является затруднительным, оценка уровня напряжений выполнялась путем решения упругой задачи.

В результате решения было установлено, что при охлаждении от температуры 1000 °С до комнатной температуры напряжения на границах многослойного материала должны соответствовать значениям 2000 МПа. С другой стороны, наши расчетные данные и известные экспериментальные результаты по определению величины остаточных напряжений в биметаллах показывают, что их величина, в условиях отсутствия релаксации в интервале температур от 500 до 20 °С, не превышает 250 МПа. Таким образом можно считать, что в интервале температур от 1000 до 500 °С происходят основные процессы, связанные с релаксацией реактивных напряжений на межслойных границах.

Проведенный металлографический анализ многослойных образцов из сталей 08X18H10 и У8 подтвердил наличие своеобразных «прослоек» между границами, которые при химическом травлении выявлялись как более светлые области, что является характерным для рекристаллизованных областей металлов. Проведение термоциклических обработок в интервале исследуемых температур показало, что рекристаллизованные области увеличиваются по толщине за счет своего распространения в слои, бывшие изначально слоями стали У8. Такое поведение может быть объяснено более высокой пластичностью этих слоев по сравнению со слоями стали 08X18H10 при высоких температурах.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКА

Поляков А.П.

*ИМАШ УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 62004, Российская Федерация,
e-mail: pap@imach.uran.ru*

Процессы динамического прессования нашли широкое применение в порошковой металлургии. Импульсное нагружение позволяет отказаться от использования крупногабаритного и дорогостоящего оборудования, повысить производительность процесса прессования. При этом процесс высокоскоростной деформации по сравнению со статическим обладает рядом особенностей, определяемых ударно-волновым характером нагружения. При разработке технологических параметров указанных процессов следует обеспечить режим нагружения, позволяющий получить заготовку с заданными свойствами. Для этого необходимо исследовать влияние на процесс нагружения размеров и исходной плотности заготовки, давления на фронте ударной волны, скорости инструмента, повышения предела текучести материала в процессе деформации, трения заготовки об инструмент и т. д.

Решение задачи динамического прессования порошков предполагает исследование процесса распространения ударных волн уплотнения. В этом случае происходящие под действием ударных волн необратимые изменения объема в материале рассматриваются на основе общих уравнений сохранения массы, количества движения и энергии, записанных для поверхности разрыва.

Полагаем, что пористое тело, находящееся в цилиндрическом контейнере и имевшее исходные размеры h_0 и $2R_0$ подвергается ударному воздействию со стороны инструмента, движущегося поступательно вниз со скоростью $v = v(t)$. В результате происходит уплотнение пористой заготовки.

Предложенная математическая модель динамического прессования порошковой заготовки в цилиндрическом контейнере позволяет в зависимости от начальной пористости, размеров заготовки, массы и скорости инструмента, сил трения определять величину и характер распределения остаточной пористости.

По результатам математического моделирования очевидно, что при массивном ударнике и его малой начальной скорости при прохождении по порошку волны сжатия плотность по высоте меняется мало и распределяется практически равномерно, волна отраженная от донной части контейнера, является волной сжатия, приводящей к дополнительному уплотнению заготовки. Затем происходит отражение этой волны от массивного ударника и т. д. (процесс повторяется многократно). С уменьшением массы инструмента (и увеличением его начальной скорости) плотность на ударной волне меняется существенно неравномерно, затем волна отражается от донной части контейнера, происходит резкое уплотнение нижних слоев заготовки. Интенсивность отраженной волны при этом резко затухает, как правило, она не достигает зоны контакта с инструментом. При этом остаточная пористость по высоте заготовки распределена неравномерно даже при отсутствии трения в силу волнового характера процесса. При высоких начальных скоростях инструмента (200 м/с и более) на фронте ударной волны плотность меняется существенно неравномерно, при отражении ударной волны от донной части контейнера происходит резкое уплотнение нижних слоев заготовки. Интенсивность отраженной волны при этом резко затухает, и, как правило, она не достигает зоны контакта с инструментом. Так, при начальной скорости ударника 240 м/с относительная плотность брикета при этом может меняться от 0,93–0,94 в области контакта с инструментом и нижней части до 0,86–0,87 в средней его части. Указанное обстоятельство может привести к значительному разбросу свойств по высоте и определяет прочность заготовки, а также к возникновению дефектов с последующим разрушением в области больших градиентов плотности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА МЕТОДОМ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ

Поляков П.А., Поляков А.П.

*Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 62004, Российская Федерация,
e-mail: pavel.katsu@gmail.com, pap@imach.uran.ru*

Современные тенденции в области исследований, касающейся разработки фундаментальных основ технологии деформирования металлических порошков, связаны с получением материалов и изделий с улучшенными или принципиально новыми свойствами, малой неоднородностью свойств, высокой пластичностью. В связи с этим возникает ряд актуальных научно-технических задач, связанных с выбором составов смесей порошков, режимов деформации и последующей термической обработки с целью создания структуры, обеспечивающей повышенные физико-механические свойства материалов.

Для исследований выбраны порошковые композиции, полученные механической активацией природно-легированных ванадийсодержащих порошков железа в смеси с Zn, Cu, P, C в количестве 1,5 мас. %. Образцы для исследования прочностных характеристик изготовлены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН, на универсальной гидравлической машине Tinius Olsen Super L60.

Порошок брикетировали односторонним прессованием в пресс-форме диаметром 9,6 мм при комнатной температуре. Брикетные имели относительную плотность 0,77–0,91. Контейнеры для выдавливания имели входной диаметр 10 мм, выходной диаметр – в диапазоне 7,5–6,0 мм, угол конусности формирующей части – 60°. В результате при вытяжках 2,05 и 2,78 получены прутки с относительной плотностью 0,89±0,01 и 0,96±0,01 соответственно. Спекание проводили в вакууме 10⁻³ МПа в вакуумной электропечи сопротивления камерного типа СНВЭ–2.4.2/16И2 в ИМЕТ УрО РАН по режиму: нагрев в течение 1 ч, выдержка при температуре 1150 °С в течение 2-х ч, охлаждение с печью до температуры 200 °С.

Измерение микротвердости на установке Fisherscope НМ 2000 ХУm выполнено по методу восстановленного отпечатка Мартенса в соответствии со стандартом ISO14577-1:2002 (ГОСТ Р 8.748-2011) в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН, в результате определялась твердость отдельных структурных составляющих порошковых композиций на поверхности брикета после спекания.

Показано, что для исходного состава, композиций с цинком и медью глубина вдавливания индентора для прутков меньше, чем для брикетов при той же плотности. Соответственно твердость HV для прутков выше, чем для брикетов. Это обусловлено процессом схватывания частиц вследствие наличия сдвиговых деформаций при выдавливании. В то же время для составов с железом-фосфором и графитом глубина вдавливания индентора для прутков увеличивается по сравнению с аналогичными значениями для брикетов и, соответственно, уменьшается твердость HV. Очевидно, это связано с недостаточным схватыванием частиц данных составов, приводящим, в том числе, к разрушению части прутков.

Что касается показателя запаса пластичности, для исходного состава его величина для брикетов и прутков для одной и той же плотности практически не меняется. Для составов с цинком, медью и железом-фосфором запас пластичности увеличивается относительно значений, полученных для брикетов из данных композиций. При этом для прутков из составов с цинком и медью показатель запаса пластичности увеличивается не только относительно значений для брикетов из данных композиций такой же плотности, но также и относительно значений параметра, полученных для прутков из исходного порошка железа, что свидетельствует о положительном влиянии добавок цинка и меди на пластичность прутков из порошковых композиций с указанными добавками после выдавливания.

Для состава с графитом показатель запаса пластичности уменьшается по сравнению со значениями, полученными для брикетов, что подтверждается результатами экспериментов, в ходе которых часть прутков из данного состава при выдавливании разрушились.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА В СМЕСИ С Zn, Cu, P, C

Поляков П.А., Мушников А.Н., Поляков А.П.

*Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 62004, Российская Федерация,
e-mail: pavel.katsu@gmail.com, mushnikov@imach.uran.ru, pap@imach.uran.ru*

В промышленности в последние годы широко используются порошковые материалы, в том числе ферромагнитные, в связи с чем важной задачей является установление зависимости магнитных характеристик порошковых композитов от их состава и способа получения.

Цель работы – определение влияния примесей, давления прессования, а также спекания на магнитные свойства получаемых материалов.

Для исследований были выбраны порошковые композиции, полученные механической активацией ванадийсодержащих порошков железа в смеси с Zn, Cu, P или C в количестве 1,5 мас. %. Образцы для исследования были изготовлены на универсальной гидравлической машине Tinius Olsen Super L60 при удельном давлении прессования 600, 700 и 800 МПа. Магнитные измерения включали в себя определение коэрцитивной силы и удельной намагниченности насыщения на установке Foerster Koerzimat 1.097. Спекание проводили в вакуумной электропечи по режиму: нагрев в течение 1 ч, выдержка при температуре 1150 °С в течение 2-х ч, охлаждение с печью до температуры 200 °С.

Удельная намагниченность насыщения слабо зависит от химического состава и среды спекания. При одинаковых условиях спекания, ее величина в основном определяется содержанием порошка железа в смеси, которое практически одинаково для всех образцов. Максимальная разница значений между образцами различного состава составляет менее 5 %. А намагниченность насыщения, рассчитанная с учетом плотности материала, монотонно возрастает с увеличением давления прессования. Коэрцитивная сила в значительной степени зависит от структуры и фазового состава. Добавление углерода значительно повышает магнитную жесткость материала – коэрцитивная сила повышается примерно в 4 раза. Смесь с фосфором является наиболее магнитно-мягкой, по сравнению с материалом без добавок коэрцитивная сила снижается почти в полтора раза. На спеченных недеформированных образцах коэрцитивная сила практически не зависит от плотности образцов, что может свидетельствовать об отсутствии остаточных напряжений после спекания. После спекания наблюдается снижение коэрцитивной силы для всех исследованных композиций, за исключением состава с графитом. Вероятно, это связано с тем, что произошло науглероживание железной матрицы и формирование перлитной структуры.

При выполнении исследований использовалось оборудование ЦКП «Пластометрия».

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ И ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ

Полянский В.А., Беляев А.К., Третьяков Д.А., Яковлев Ю.А.

*Институт проблем машиноведения РАН,
199178, Санкт-Петербург, В.О. Большой пр. 61, Российская Федерация,
e-mail: vice.ipme@gmail.com, vapol@mail.ru, dmitry.tretyakov93@yandex.ru, yura.yakovlev@gmail.com*

Пластическая деформация образцов, как правило, предшествует их разрушению, разработка моделей пластической деформации, особенно в случае, когда она перестает быть равномерной и локализуется, актуально для всех технических систем.

Проведенные нами исследования показывают, что пластическая деформация, не связанная с технологией производств деталей, а вызванная механическими рабочими нагрузками, имеет выраженный поверхностный эффект. Этот эффект заключается в том, что на внешней поверхности детали или образца формируется специфический слой металла, толщиной порядка размеров зерна.

Этот слой имеет ярко выраженные особые акустические свойства, которые делают возможным его идентификацию акустическим методом. Проведенные нами эксперименты показывают, что после разрушения образцов металла при растяжении (циклическом или монотонном) образуется дополнительная акустическая анизотропия, которая по абсолютной величине, как правило, на порядок превосходит акустопругий эффект. Причем внутренние области металла никакого вклада в эту анизотропию не дают. Полученные результаты можно использовать для диагностики степени усталости и поврежденности металла.

Поверхностный слой отличается очень большими концентрациями растворенного водорода. Наши исследования показывают, что при пластических деформациях происходит насыщение именно тонкого поверхностного слоя металла до уровня в десятки ppm. В комбинации с данными акустических исследований этот результат позволяет говорить о водородном характере повреждений поверхностного слоя и индуцированном водородом процессе разрушения, механизмы которого еще предстоит исследовать.

Особый интерес представляют данные по локализации пластических деформаций. Эта локализация может иметь разные формы, чаще всего она формируется в виде полос Людерса. Наши исследования показывают, что в зонах локализации пластической деформации наблюдается повышенное содержание водорода, который также распределен преимущественно в слое толщиной 60–100 мкм у поверхности образцов.

Таким образом, можно сделать предположение о том, что диффузия водорода может быть вызвана полосами Людерса и имеет поверхностный характер. С одной стороны, это объясняет известные опыты, в которых при катодном насыщении водородом металлической проволоки под нагрузкой происходил сброс напряжений, причем именно в случае, когда растяжение проволоки происходило в пластической области. С другой стороны, удаление водорода или купирование каналов его поступления из внешней среды могут существенно продлить срок эксплуатации деталей конструкций.

Для проверки этих предположений мы проводили шлифовку поверхностного слоя стальных корсетных образцов на глубину примерно 60 мкм. До и после шлифовки образцы испытывали на усталость. Установлено, что такая однократная шлифовка примерно после 50 000 циклов нагрузки позволяет на 50–60 % увеличить ресурс металла с 60 до 90 тыс. циклов.

Полученные данные позволяют сформулировать новые принципы диагностики разрушения и восстановления деталей при ремонтах и техническом обслуживании конструкций.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проекты 17-08-00783, 18-08-00201 и 18-31-00329.

ПРОГНОЗ РЕСУРСА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМИТНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Попов А.В., Комаров О.Н., Предеин В.В., Жилин С.Г.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
д. 1, ул. Металлургов, г. Комсомольск-на-Амуре. 681005, Российская Федерация,
e-mail: popov.av@protonmail.ch*

В ряду основных задач литейного производства, кроме непосредственно получения литых заготовок, важное место занимает обеспечение энерго- и ресурсоэффективности производства. Разработка технологических процессов получения отливок с использованием отходов машиностроительных предприятий позволяет повысить конкурентоспособность последних за счет снижения затрат на шихтовые материалы. Сократить долю металла, получаемого традиционным переплавом лома в общем объеме отливки можно за счет алюмотермитного способа восстановления железа из смеси отходов машиностроения: окалины, стружки черных и цветных металлов [1, 2]. Структура и свойства отливок из таких термитных сплавов в ряде случаев отличаются от традиционных сталей. Параметрами температурных режимов, определяющих структуру отливки, являются: температура шихты до активации экзотермического процесса, температура литейной формы в момент разлива расплава, температура продуктов реакции, зависящая от начальных условий [3]. Экономическая целесообразность использования отмеченного метода, недостаток сведений о процессах регулирования конечных свойств отливок из термитных сплавов и, как следствие, невозможность прогнозирования ресурса получаемых отливок, определяют актуальность изучения процесса. Таким образом, целью эксперимента является получение отливок целиком из термитного сплава и на основе результатов контроля структуры и свойств неразрушающими методами прогнозирования ресурса получаемых литых изделий.

В ходе серии экспериментов из железоуглеродистого сплава, полученного методами алюмотермии, из одинакового шихтового состава при различных температурных параметрах изготовлены отливки типа «Крестовина», предназначенная для использования в качестве разветвителя гидросистем. Термитная шихта состояла из окалины и восстановителя в соотношении 75 % и 25 %, соответственно. Отливки получены при различных сочетаниях температур шихты и формы в диапазоне от 25 °С до 400 °С. Форма изготавливалась механической обработкой графитированных электродов ЭГ15. Экспериментально определен температурный режим, позволяющий получить отливки без газовой пористости, усадочных дефектов и недоливов. Для этой серии отливок проводились испытания на прочность. Требуемым значениям прочности удовлетворяли отливки, полученные при температурах шихты и формы 25 °С. Дальнейшие характеристики изделий определяли без их разрушения. Оптическим анализом выявлены технологически прогнозируемые различия в структуре в зависимости от высоты отливки. Структура характеризуется как ферритно-перлитная. На основе анализа карт распределения химических элементов, полученных методом электронно-дисперсионной спектроскопии на РЭМ Carl Zeiss EVO LS-10 с EDS-приставкой Oxford Instruments X-max, существенных расхождений значений по высоте отливки не установлено. Пневматическим испытанием крестовины на герметичность под давлением 1,6 кгс/см² (согласно СН 298-65) установлена эксплуатационная стойкость полученной отливки. Таким образом, экспериментальный способ получения литых изделий из термитных сплавов позволяет изготавливать отливки низкой себестоимости, с прогнозируемыми свойствами и требуемым эксплуатационным ресурсом.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00285-18-00

Литература

1. Резервы экономии металла в литейном производстве / П. А. Вареник, Г. Д. Хуснутдинов, Ю. П. Зятковская, Л. В. Краля // Процессы литья. – 1990. – № 1. – С. 84–87.
2. Новохацкий В. А., Жуков А. А., Макарычев Ю. И. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями. – М. : Машиностроение, 1986. – 64 с.
3. Сапченко И. Г., Комаров О. Н., Жилин С. Г. Использование термитных материалов в технологиях получения стальных отливок: монография. – Владивосток : Изд-во Дальнаука, 2008. – 166 с.

ПРЕРЫВИСТАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ: ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ ПРИМЕСЕЙ И ДИСЛОКАЦИЙ

Попов Ф.С.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, ул. Комсомольский проспект, Пермь, 614000, Российская Федерация,
e-mail: popovfyodor@yandex.ru*

В современном мире существует постоянно возрастающее количество материалов и технологий обработки этих материалов для получения изделий с заданными свойствами. При определенных условиях обработки материалов могут возникать негативные эффекты, которые приводят как к неустойчивости процесса обработки, так и к изменению свойств готового изделия. В рассматриваемой работе исследуется процесс прерывистой пластичности [1] при неупругом деформировании поликристаллических образцов. Прерывистая пластичность наблюдается практически для всех сплавов в определенных температурных и скоростных режимах, в особенности – при невысоких скоростях деформирования и повышенных температурах.

Первым, кто предложил механизм возникновения прерывистой пластичности, был Коттрелл [2]. Он предположил, что вокруг подвижной дислокации формируется облако примесных атомов, которое движется с дислокацией, пока ее скорость не превысит некоторого критического значения, при увеличении скорости дислокация отрывается от следующего за ней облака. В современных работах это явление связывается с динамическим деформационным старением [3, 4].

В предлагаемой работе рассматриваются вопросы построения многоуровневой дислокационно-ориентированной математической модели. Развитию моделей данного класса в последние 10–15 лет уделяется огромное внимание [5]. Рассматривается структура и математическая постановка прямой математической модели для описания неупругого деформирования материалов с особым вниманием к описанию прерывистой пластичности. В рассмотрении вводятся 3 уровня с соответствующим описанием наиболее важных физических механизмов: макроуровень, мезоуровень-1 и мезоуровень-2. Отличительной особенностью модели является построение соотношений для мезоуровня-2, которые содержат описание следующих механизмов: зарождение и аннигиляцию дислокаций, взаимодействие дислокаций друг с другом (как на одной, так и на различных системах скольжения), образование барьеров, а также взаимодействие дислокаций с атомами примеси (образование облаков из атомов примеси вокруг дислокации и отрыв дислокации от этого облака). Приведены результаты расчетов зависимостей плотностей дислокаций и критических напряжений от деформаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-41-590694-р_а).

Литература

1. Portevin A., Le Chatelier F. Sur unphenomene observe lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation // *Compt. Rend.Acad. Sci. Paris.* – 1923. – Vol. 176. – P. 507–510.
2. Cottrell A. H. Dislocations and plastic flow in crystals. – Oxford : University Press, 1953.
3. Alankar A., Field D., Zbib M. Explicit incorporation of cross-slip in a dislocation density-based crystal plasticity model // *Philosophical Magazine.* – 2012. – Vol. 92 (24). – P. 3084–3100.
4. Plastic instabilities and dislocation densities during plastic deformation in Al–Mg alloys / G. Horváth, N. Q. Chinh, J. Gubicza, J. Lendvai // *Materials Science and Engineering: A.* – 2007. – Vol. 445–446. – P. 186–192. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.09.019.
5. Трусов П. В., Швейкин А. И. Теория пластичности. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2011. – 419 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Шляхова Г.В., Зуев Л.Б., Попова Е.А.

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4, Российская Федерация,
e-mail: popova@ispms.tsc.ru*

Традиционно при изучении структуры сталей и сплавов широко применяют такие методы микроскопии, как оптическая, просвечивающая и сканирующая электронная, которые являются достаточно трудоемкими и дорогостоящими методами (кроме оптической микроскопии). Однако существует относительно недорогой и не требующий сложной пробоподготовки метод который можно эффективно использовать при изучении микрорельефа поверхности любых материалов, как проводящих, так и непроводящих. С его помощью можно наблюдать всевозможные особенности структуры, на изучаемых поверхностях. АСМ обеспечивает получение 3D-изображений поверхностных ультраструктур с молекулярным разрешением в режиме реального времени.

В работе исследованы структуры доэвтектоидной конструкционной рессорно-пружинной марганцевой стали 65Г и эвтектоидной инструментальной стали У8. Для анализа структуры указанных выше сталей использовались две методики: традиционная – оптическая микроскопия (Neophot-21) и атомно-силовая микроскопия (Solver PH47-PRO) с использованием контактного метода. Исследование микроструктуры указанных сталей проводилось после проведения полного отжига, т. е. нагрев выше критической точки A_{c3} и медленное охлаждение с печью. Температура нагрева в соответствии с определением полного отжига для конструкционной рессорно-пружинной стали 65Г составила 770–790 °С. Температура отжига для инструментальной углеродистой стали У8 составила 760–780 °С. Атомно-силовой анализ структуры исследуемых сталей проводился с использованием различных режимов. В работе показаны перспективы использования атомно-силовой микроскопии в решении теоретических и прикладных задач современного металловедения.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук России на 2013–2020 гг. и частично поддержана грантом РФФИ № 17-08-00751-а.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ СРЕД ПРИ ОДНОКРАТНОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Порошин В.Б., Шлишевский А.В.

*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),
76, проспект им. Ленина, Челябинск, 454080, Российская Федерация,
e-mail: poroshin2816@mail.ru*

Оценка работоспособности элементов конструкций с дефектами типа пор предполагает использование адекватных деформационных и прочностных характеристик, которые, разумеется, будут отличны от соответствующих величин исходного сплошного материала. Такого рода дефекты могут возникать как естественным путем, например, при отливке массивных заготовок сложной формы, так и быть внедрены искусственно – среды типа металлической пены, применяемой, в частности, в сэндвич-панелях.

В связи с этим рассмотрена методика прогнозирования деформационных и прочностных свойств металлических материалов с равномерно распределенными по объему изделия дефектами в виде газовых пузырьков при однократном и циклическом нагружении. Предлагаемый подход базируется на использовании соответствующих характеристик бездефектного материала (традиционной диаграммы деформирования, ресурса пластичности, кривой циклического деформирования и циклической кривой, а также кривой усталости) и результатах численных экспериментов на моделях образцов с различной объемной долей дефектов (степенью пористости среды). Анализ напряженно-деформированного состояния виртуальных образцов производили методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS. Момент достижения предельного состояния – нарушения сплошности – при монотонном нагружении фиксировали с помощью деформационного критерия В.Л. Колмогорова.

В случае однократного нагружения определены упругие константы и диаграммы деформирования вплоть до момента разрушения модельной среды, имитирующей материал с различной степенью пористости (возможную смену механизма деформирования вследствие потери устойчивости стенок газовых пузырьков, сопровождаемой пластическим течением материала матрицы, не учитывали). Отмечено свойство центрального подобия кривых деформирования, что позволяет на основе базовой кривой и зависимости коэффициента центрального подобия от степени пористости построить диаграмму деформирования материала с произвольной степенью пористости. В условиях циклического нагружения, актуального в условиях эксплуатации машиностроительных конструкций, получены как кривые циклического деформирования, представляющие траекторию точки состояния в пространстве «напряжение ~ деформация» в течение цикла, так и циклические кривые – зависимости амплитуды напряжения от амплитуды деформации – отражающие упрочнение материала различной степени пористости. Показано, что в общем случае принцип Мазинга в отношении кривых циклического деформирования несправедлив, а степень соответствия ему зависит от амплитуды деформации. Описание кривых усталости, характеризующих в данных условиях прочностные свойства, выполнено с помощью зависимости типа уравнения Мэнсона-Лэнжера.

Представленное исследование продолжает работу «Development of a Model of a Homogeneous Continuous Medium Based on the Material with Defects in the Form of Hollows», опубликованную в журнале «MATEC Web of Conferences 129, 02017 (2017)» (ISSN: 2261-236X, Франция).

Его результаты могут быть использованы как для нормирования допускаемых размеров дефектов и их плотности, так и для назначения обоснованных коэффициентов запаса прочности по напряжению, деформации и долговечности реальной пористой среды.

УСТАНОВЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОТЕРИ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО ОДНОСТУПЕНЧАТОГО НАСОСА

Овчинников Н.П., Портнягина В.В., Гуляев В.П., Собакина М.П.

*Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова,
д. 18, ул. Белинского, Якутск, 677000, Российская Федерация,
e-mail: vick_i@mail.ru*

Практика показывает, что наиболее надежными центробежными насосами, занятыми в системах водоотлива подземных кимберлитовых рудников компании «АЛРОСА», являются насосы типа X, которые представляют собой одноступенчатые турбомашины с консольным расположением рабочего колеса на валу.

Их средняя наработка до капитального ремонта приблизительно в четыре раза выше, чем у остальных видов насосов, используемых на рассматриваемых рудниках (6900 мото-ч против 1800 мото-ч). Более высокая надежность насосов типа X объясняется их простотой в плане конструкции, а также коррозионностойким исполнением.

Несмотря на ряд достоинств, за время эксплуатации на кимберлитовом руднике «Удачный» эти насосы несколько раз выводились в аварийные ремонты вследствие излома вала. Проведенные работниками ремонтной службы Удачинского ГОКа обследования свидетельствуют, что одной из явных причин разрушения валов было низкое техническое состояние посаженных на них рабочих колес. Под низким техническим состоянием следует понимать интенсивный механический износ рабочих колес, неравномерность которого по всей их площади вызывала значительный рост вибрации валов, из-за чего валы с течением времени и выходили из строя.

Таким образом, видно, что снижение металлоемкости рабочего колеса насоса типа X отрицательно сказывается на техническом ресурсе его вала.

Работа посвящена решению следующей научно-практической задачи – установлению предельной потери металлоемкости рабочего колеса в зависимости от степени надежности вала.

Полученные результаты исследований являются востребованными с практической точки зрения, так как в перспективе позволят снизить риск возникновения аварийных отказов важнейшего элемента в конструкции рассматриваемого типа насоса.

Результаты проведенных авторами исследований будут полезны специалистам, эксплуатирующим насосное оборудование в условиях гидроабразивного изнашивания.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДАЧИ КОНЦОВ ТОНКОСТЕННЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Потянихин Д.А.¹, Марьин Б.Н.², Пхон Хтет Кьяв²

¹*Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук,
д. 1, ул. Металлургов, г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация,*

²*Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
д. 27, пр. Ленина, г. Комсомольск-на-Амуре, 681013, Российская Федерация,
e-mail: potyanikhin@mail.ru*

Важной задачей в машиностроении является изготовление прочных, долговечных и надежных трубопроводов, работающих в условиях высокого давления. Они должны выдерживать динамические нагрузки и гидравлические удары. Опыт показывает, что большинство разрушений трубопроводов в процессе эксплуатации происходит в местах изгиба или изменения диаметра, а также в местах соединения труб, в том числе из-за уменьшения прочности материала в зоне термического влияния сварного шва [1].

Одним из способов повышения надежности трубопроводов является создание соединительных патрубков особой геометрической формы, что позволяет снизить перепады давления. В настоящее время экспериментально получены и исследованы трубные заготовки, торцы которых образованы путем раздачи по жесткому пуансону [2]. В частности, были получены заготовки с использованием пуансонов конической осесимметричной формы и седловидной формы. Тем самым была показана возможность практического применения предлагаемой технологии даже при комнатной температуре. Однако для определения параметров процесса раздачи концов трубных заготовок, обеспечивающих допустимые деформации и уровень остаточных напряжений, необходимо провести всесторонние параметрические исследования методами компьютерного моделирования.

Цель настоящей работы – моделирование в конечно-элементном пакете ANSYS процесса формоизменения трубной заготовки путем наползания одного из ее концов на пуансон заданной формы. Как в эксперименте, были выбраны седловидная и осесимметричные формы пуансона. При построении модели предполагалось, что процесс проходит в квазистационарном режиме, что соответствует условиям проведения эмпирических исследований. Рассматривались деформации и напряжения в образце при обработке давлением, а также распределение остаточных напряжений и упругое последствие после снятия нагрузки.

Параметрические исследования проводились для трубных заготовок с внутренним диаметром от 10 до 40 мм и толщиной стенки от 0,1 до 1,5 мм. Были найдены геометрические параметры заготовок и пуансонов, обеспечивающие уровень напряжений, не превосходящий допустимых значений. Найдена граница пластических деформаций.

Предлагаемая технология позволяет повысить прочность, надежность и долговечность трубопроводов и их элементов и имеет широкие перспективы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМиМ ДВО РАН №007-00285-18-00.

Литература

1. Хейн Вин Зо, Марьин С. Б., Колыхалов Д. Г. Изготовление трубных конструкций высокой надежности для летательных аппаратов // *Авиационная промышленность*. – 2015. – № 3. – С. 31–34.
2. Исследование совмещенных процессов при изготовлении деталей летательных аппаратов / Б. Н. Марьин, С. И. Феоктистов, Д. Г. Колыхалов, В. В. Куриный, И. Н. Иванов // *Ученые записки КнАГТУ*. – 2016. – Т. 1, № 2 (26). – С. 34–41.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОХЛАЖДЕННОЙ ЗАКЛЕПКИ ПРИ СОЗДАНИИ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Потянихин Д.А.¹, Дубенко Е.М.²

¹Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук,
д. 1, ул. Металлургов, г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация,

²Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
д. 27, пр. Ленина, г. Комсомольск-на-Амуре, 681013, Российская Федерация,
e-mail: potyanikhin@mail.ru

Неразъемные заклепочные соединения широко используются в машиностроении, в частности в авиационном производстве. В зависимости от назначения к соединениям предъявляются требования прочности, жесткости и герметичности. Отверстия под заклепки в деталях получают продавливанием или сверлением. Поверхности таких отверстий могут иметь дефекты в виде трещин, шероховатостей или острых кромок, что уменьшает герметичность и прочность соединения на срез. Одним из способов преодоления таких последствий поверхностных дефектов является горячая клепка. Стальную заклепку нагревают до 1100 °С и вставляют в отверстие соединяемых элементов. При остывании заклепка укорачивается и плотно стягивает соединяемые детали.

Однако в конструкциях из алюминиевых сплавов допускается только холодный способ клепки [1], при этом заклепка и соединяемые элементы должны быть из одного сплава. В работе [2] рассматривается способ создания заклепочного соединения с помощью азотного охлаждения заклепок. В отверстие соединяемых элементов, находящихся при комнатной температуре, помещают охлажденную в азоте заклепку. Нагреваясь до комнатной температуры, заклепка подвергается тепловому всестороннему расширению и создает посадку с натягом. Возникающие в материале заклепки и соединяемых элементов пластические деформации, как предполагается, сглаживают острые кромки и образуют плотное соединение.

В настоящей работе моделирование теплового расширения предварительно охлажденной в азоте заклепки при создании заклепочного соединения производится в конечно-элементном пакете ANSYS. Решается несвязанная задача термоупругопластичности. На первом этапе решается задача о распределении температуры в системе «заклепка–пластина». В начальный момент времени заклепка имеет температуру в диапазоне от –200 до –50 °С. Диаметр отверстия равен диаметру охлажденной заклепки. Материал сборки АМг5П. Полученное решение температурной задачи используется как параметр на втором этапе при решении деформационной задачи. Учитывается зависимость параметров материала от температуры.

Таким способом, была проведена серия вычислительных экспериментов для разных температур устанавливаемой заклепки в изучаемом диапазоне. Получены поля остаточных деформаций и остаточных напряжений в пластине и заклепке.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМиМ ДВО РАН № 007-00285-18-00.

Литература

1. Детали машин и основы конструирования : учеб. пособие / С. М. Горбатюк и др. / под ред. С. М. Горбатюка. – М. : Изд. дом МИСиС, 2014. – 424 с.
2. Ткачева А. В., Соснин А. А. Математическое моделирование горячей посадки заклепки в отверстия // II Дальневосточная школа-семинар «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций», Комсомольск-на-Амуре, 11–15 сентября 2017 г. : материалы / отв. ред. А. И. Евстигнев и др. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. – С. 79–81.

КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ КУЭТТА-ХИМЕНЦА. ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ЛИНЕЙНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ СЛОЯ ЖИДКОСТИ

Привалова В.В., Просвиряков Е.Ю.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: valentprival@gmail.com, evgen_pros@mail.ru*

В настоящей статье сделана попытка обобщить установившееся классическое решение Куэтта для случая ползущих течений неизотермических вязких несжимаемых жидкостей. Говоря о течении Куэтта при конвективном перемешивании жидкости, речь прежде всего шла о граничных условиях, задаваемых в виде скоростей на одной или обеих границах бесконечного слоя. В статьях [1, 2–5] показано, что для описания ползущих конвективных потоков вместо класса решений Куэтта необходимо использовать точное решение Хименца [6] с дальнейшей линеаризацией уравнений Обербека–Буссинеска. Использование класса Хименца позволяет учесть не только горизонтальную скорость, но и распространение импульсов в поперечном направлении. Кроме того, модификации течения Хименца с успехом применяются в гидродинамике неизотермических высоковязких многослойных жидкостей.

В работе получено обобщение установившегося классического решения Куэтта для неизотермических вязких несжимаемых жидкостей. Изучен линейный случай распределения температуры на свободной границе. Показано существование «застойных» точек у гидродинамических полей при определенных ограничениях на физические постоянные и граничные условия. Посредством методов локализации корней у полиномиальных решений изучены качественные и количественные свойства полученных точных решений в классе линейно растущих скоростей по горизонтальным координатам.

Литература

1. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Неоднородное конвективное течение Куэтта // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2016. – № 5. – С. 3–9. – DOI: 10.7868/S0568528116050030.
2. Пухначев В. В., Пухначева Т. П. Задача Куэтта для среды Кельвина-Фойхта // Вестн. НГУ. Сер. Математика, механика, информатика. – 2010. – Т. 10, вып. 3. – С. 94–109.
3. Скульский О. И., Аристов С. Н. Механика аномально вязких жидкостей. – Москва–Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 156 с.
4. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное неизотермическое течение Куэтта. Квадратичный нагрев верхней границы слоя жидкости // Нелинейная Динамика. – 2016. – Т. 12, № 2. – С. 167–178. – DOI: 10.20537/nd1602001.
5. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Об одном классе аналитических решений стационарной осесимметричной конвекции Бенара–Марангони вязкой несжимаемой жидкости // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2013. – № 3 (32). – С. 110–118.
6. Hiemenz K. Die Grenzschicht an einem in den gleichförmigen Flüssigkeit-sstrom eingetauchten geraden Kreiszyylinder // Dingler's Politech. J. – 1911. – Vol. 326. – P. 321–324.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА В ПОДВОДНОМ ПЕРЕХОДЕ ПРИ ПРОВИСЕ ГАЗОПРОВОДА В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗМЫВА ПРОФИЛЯ РЕКИ

Большаков А.М., Прокопьев Л.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, 677980, Российская Федерация, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская 1, e-mail: a.m.bolshakov@mail.ru, l.prokopyev@yandex.ru

Цели

Прогнозируемый предельный профиль размыва русла реки, определяемый в результате инженерных изысканий при строительстве магистрального газопровода не всегда совпадает с фактическими значениями, полученными при водолазном обследовании через десятилетия эксплуатации газопровода. В результате этого появляются непроектные открытые участки магистрального газопровода, подверженные непроектным механическим нагрузкам. Целью расчетов является определение напряженно-деформированного состояния подобных непроектных участков газопровода.

Результаты

На примере объекта «межпромысловый коллектор основной нитки СВГКМ» ОАО «ЯТЭК», Республика Саха (Якутия) смоделировано напряженно-деформированное состояние непроектного положения магистрального газопровода при переходе через водную преграду. Показано наличие концентрации напряжений на выходе газопровода из подземного участка, а также по нижней образующей.

Выводы

При отсутствии у газопровода заводских и эксплуатационных дефектов текущие условия работы рассматриваемого участка не представляют опасности разрушения; однако зоны концентрации напряжений могут способствовать развитию усталостных и иных процессов деградации металла газопровода.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Привалова В.В., Просвиряков Е.Ю.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: valentprival@gmail.com, evgen_pros@mail.ru*

В данной работе рассмотрены точные решения трехмерных нелинейных течений вязкой несжимаемой жидкости:

$$V_x(x, y, z) = U(z) + xu_1(z) + yu_2(z);$$

$$V_y(x, y, z) = V(z) + xv_1(z) + yv_2(z);$$

$$V_z = w = \text{const};$$

$$P(x, y, z) = P_0(z).$$

Рассматриваемые решения относятся к классу решений Линя [1–4], представляющих собой скорости, линейно зависящие от части координат, что позволяет их использовать для описания крупномасштабных течений Мирового океана.

Полученное точное решение описывает течение вертикально завихренной жидкости. Вертикальная закрутка в жидкости возникает из-за учета сил инерции и неоднородного распределения скоростей или касательных напряжений на границах слоя жидкости. Это решение позволяет описывать противотечения и усиление колебаний в вязкой несжимаемой жидкости для течений в тонком слое [2–4]. Таким образом, полученное точное решение уравнений Навье-Стокса описывает новый механизм переноса импульса в жидкости.

Исследования изобарических течений вязкой несжимаемой жидкости ранее были проведены для случая равенства нулю одной из компонент вектора скорости [3, 4]. Обсуждались также точные решения и их физический смысл для трехмерных изобарических течений вязкой несжимаемой жидкости.

Были проанализированы полученные решения. Показано существование «застойных точек» – точек, имеющих скорости, равные нулю в рассматриваемом слое жидкости.

Литература

1. Lin C. C. Note on a class of exact solutions in magneto-hydrodynamics // Arch. Rational Mech. Anal. – 1958. – Vol. 1. – P. 391–395.
2. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 294–301.
3. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9, № 4. – С. 651–657.
4. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Неоднородное конвективное течение Куэтта // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2016. – № 5. – С. 3–9.

НОВЫЕ КЛАССЫ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ–СТОКСА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОЛЗУЩИХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКИХ НЕСЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ПРИБЛИЖЕНИИ СТОКСА И ОЗЕЕНА

Просвиряков Е.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Россия,
e-mail: evgen_pros@mail.ru*

В статье был предложен новый класс точных решений нелинейных уравнений термодиффузии, описывающих течение вязких несжимаемых жидкостей. Поле скоростей в линейно зависит от двух координат, которые являются горизонтальными (продольными) при описании крупномасштабных течений. Этот класс точных решений удовлетворяет не только нелинейным уравнениям Навье–Стокса и их модификациям, но и линеаризованной системе уравнений (приближению Стокса и Озеена).

В силу того, что системы уравнений Навье–Стокса в приближении Стокса являются линейными, то класс точных решений может допускать обобщение. Показано, что поле скоростей может быть описано многочленами относительно двух координат произвольной степени. Коэффициенты этих многочленов зависят от третьей координаты и времени. В этом случае полиномиальная форма давления будет иметь степень на единицу большую, чем скорости.

Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений уравнений термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 294–301.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Просвиряков Е.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Россия,
e-mail: evgen_pros@mail.ru*

Вертикальная закрутка в жидкости всегда возникает при твердотельном вращении. В качестве примера можно указать течение Экмана. В статьях [1–2] был приведен пример точного решения уравнений Навье-Стокса, иллюстрирующий крупномасштабное течение вертикально завихренной вязкой несжимаемой жидкости при отсутствии вращения. Течения с таким свойством могут описывать экваториальные противотечения при постоянной вертикальной скорости и существование застойных точек. Конвективные течения вертикально завихренной жидкости, движущейся вне поля Кориолиса, начаты исследоваться в [3]. В статье [4] приведен класс точных решений для уравнений термодиффузии. В докладе будет представлено развитие идей, предложенных в [1–4], объясняющих расслоение гидродинамических полей сдвиговых течений в тонких слоях жидкости.

Литература

1. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Неоднородные течения Куэтта // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 177–182.
2. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Крупномасштабные течения завихренной вязкой несжимаемой жидкости // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2015. – № 4. – С. 50–54.
3. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Неоднородное конвективное Куэтта // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2016. – № 5. – С. 3–9.
4. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений уравнений термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 294–301.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Прохоров А.Е.¹, Петрова А.Н.², Плехов О.А.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия,

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: Prokhorov.a@icmm.ru

Деградация механических свойств материалов в процессе их эксплуатации является достаточно хорошо изученной областью в современной механике усталостного разрушения при этом современные тенденции развития техники требуют, как разработки новых конструкционных материалов, так и анализа возможности использования традиционных материалов в нестандартных условиях. Одной из актуальных современных проблем механики усталостного разрушения является описание процесса перехода от дисперсного к макроскопическому разрушению в режиме гигациклового усталости. Основной особенностью процесса усталостного разрушения на базе $1E+9$ циклов испытаний является образование характерной структуры на поверхности разрушения, называемой «fish-eye» [1]. Анализ опубликованных экспериментальных работ показывает, что существуют материалы, поведение которых имеет отличный от образования «fish-eye» сценарий разрушения. Примером такого материала является армко-железо [2]. Несмотря на то, что многими исследовательскими группами используются различные подходы к изучению вопроса зарождения усталостных трещин в армко-железе [3] до сегодняшнего дня ясного представления об этом процессе не сформировано.

В данной работе проводится экспериментальное исследование поведения армко-железа в режиме гигациклового усталости. Работа направлена на экспериментальный анализ эволюции дефектной структуры в процессе перехода в режиме гигациклового усталости и механизмов зарождения макроскопических дефектов в армко-железе. Испытания проводились на ультразвуковой испытательной машине Shimadzu USF-2000 с частотой нагружения 20 кГц. Структурные исследования проводились с использованием электронно-сканирующего микроскопа Quanta-2000.

В результате работы построена кривая усталости армко-железа в диапазоне испытаний до $10E+9$. Особое внимание уделено исследованию процесса перегрева металлических образцов в процессе ультразвуковых испытаний и сопоставимости результатов ультразвуковых испытаний и традиционных усталостных тестов. В работе проведен детальный анализ влияния окружающей среды на процесс разрушения армко-железа в режиме гигациклового усталости, исследована эволюция кривой усталости в зависимости от среды испытаний (условий охлаждения). Испытания проводились с использованием двух типов охлаждения: сжатым воздухом и водой. В результате проведенных испытаний было показано, что способ охлаждения образца в процессе испытания влияет как усталостную долговечность, так и на механизм разрушения образца. Разрушение образцов в двух случаях имеет принципиально различные структурные особенности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-48-590148 p_a

Литература

1. Mughrabi H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime // International Journal of Fatigue. – 2006. – Vol. 28. – P. 1501–1508.
2. Gigacycle fatigue initiation mechanism in Armco iron / C. Wang, D. Wagner, Q. Y. Wang, C. Bathias // International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 45. – P. 91–97.
3. Plekhov O. A., Naimark O., Saintier N. Experimental study of energy accumulation and dissipation in iron in an elastic-plastic transition // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 52, no. 9. – P. 1236–1238.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕМСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СИНТЕЗЕ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ Fe-Ni-Ti-C-B

Пугачева Н.Б.¹, Николин Ю.В.², Малыгина И.Ю.¹, Трушина Е.Б.¹

¹ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия,

²ООО «Солид Флэйм», д. 54, кор. 5, пр. Ленина, г. Екатеринбург, 620075, Россия,
e-mail: nat@imach.uran.ru

Композиционные материалы, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), представляют собой особый класс материалов, отличающихся повышенной твердостью, теплостойкостью и износостойкостью. Особенно ярко эти свойства проявляются при интенсивном абразивном изнашивании, когда другие материалы не обеспечивают необходимой долговечности механизмов и конструкций. Несмотря на то, что проблема создания новых композиционных материалов с использованием метода СВС достаточно успешно решается в течение 50 лет, явления, происходящие при вторичном структурообразовании, изучены пока недостаточно. При создании износостойких СВС-композитов основное внимание обычно уделяется упрочняющим фазам – карбидам и боридам, которые обеспечивают высокие значения твердости и износостойкости. Практически все еще не выявлены особенности строения и роль металлической матрицы в формировании эксплуатационных свойств материалов, получаемых методом СВС, а также виды и механизмы взаимодействия частиц упрочняющих фаз с матрицей. Противоречивы данные по влиянию эвтектик, неизбежно появляющихся в процессе синтеза многокомпонентных систем, таких как Fe-Ni-Ti-C-B.

Цель настоящего исследования – установление последовательного изменения структурного состояния композиционных материалов системы Fe-Ni-Ti-C-B на разных стадиях процесса СВС. Композиты получали безгазовым твердофазным методом СВС при стационарном режиме горения с постоянной скоростью перемещения фронта горения. Исходными материалами для исследования были порошки Ti, Fe, C и V₄C. Структуру композитов исследовали непосредственно после синтеза и горячей пластической деформации при 1200 °С под нагрузкой 250 МПа. Для исследований использовали современные методы структурного анализа: металлографию, фазовый рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный анализы, дюрometriю.

В СВС выделяют три основные стадии: горение, образование новых фаз и охлаждение продуктов горения. На стадии горения происходят экзотермические реакции, повышающие температуру порошковой смеси вплоть до температур плавления ее составляющих. Основными экзотермическими реакциями для исследованного процесса являются $Ti + C \rightarrow TiC + Q$, $Ti + V_4C \rightarrow TiC + TiV_2 + Q$, $C + O_2 \rightarrow 2 CO_2 + Q$. В результате образуется монолитный композит с матрицей на основе твердого раствора никеля в железе с ГЦК-решеткой, в котором расположены дисперсные частицы TiC и TiV₂. Борид железа Fe₂B, образующийся по химической реакции $2Fe + V_4C + O_2 \rightarrow FeV_2 + CO_2$, входит в состав эвтектической структурной составляющей и имеет скелетообразную форму. После завершения процесса синтеза материал характеризуется развитой пористостью, поскольку в результате химических реакций образуется большое количество газообразных веществ. Для устранения порообразования заготовку сразу после завершения синтеза переносят в гидравлический пресс и подвергают деформации. В результате формируется беспористый монолитный композит с твердостью 72 HRC. Температура эвтектики L→γ-Fe + Fe₂B составляет 1177 °С, т. е. при горячей пластической деформации композита происходит образование жидкой фазы, которая заполняет существующие микропоры, при охлаждении этого расплава образуются дисперсные частицы боридов железа Fe₂B размерами 2–4 мкм, которые дополнительно упрочняют композит.

Работа выполнена в рамках выполнения госзадания по теме № 0391-2016-0002.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ РАБОТЕ В СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Путилова Е.А.¹, Пышминцев И.Ю.², Веселов И.Н.², Горкунов Э.С.¹, Задворкин С.М.¹

¹ИМАШ УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия,

²ОАО «РосНИТИ», 30, ул. Новороссийская, г. Челябинск, 454139, Россия

Развитие арктических регионов и осуществление масштабных проектов в северных широтах по добыче и транспортировке нефти и газа тесно связано с необходимостью создания и внедрения новых технологий и материалов как для магистральных трубопроводов, в том числе подводных, так и для нефтегазопромысловых труб, устойчивых к экстремальным температурно-силовым воздействиям и обеспечивающих долговечность, надежность и экономичность применяемых конструкций. По мере увеличения глубины залегания углеводородов к материалам для бурения скважин предъявляются требования все более высокой прочности (для обеспечения надежности на больших глубинах и, соответственно, при большом весе обсадных колонн) и коррозионной стойкости, в частности к воздействию сероводорода и углекислого газа. Однако, как известно, чем выше прочность стали, тем выше у нее склонность к сульфидному растрескиванию под напряжением (СРН). В связи с этим актуальной задачей является создание стойких к СРН сталей с повышенной прочностью (с пределом текучести выше 758 МПа). Создание сталей с подобными свойствами позволит выдерживать большой вес обсадной колонны, повысить сопротивление труб давлению горных пород при меньшей толщине стенок труб. Решением данной задачи может стать внедрение сталей, упрочняемых не по дислокационному механизму, поскольку дислокации служат местами захвата водорода и способствуют СРН, а по дисперсионному с выделением дисперсных карбидов. Этого удастся достичь путем специального легирования и проведения после закалки длительного высокотемпературного отпуска.

С целью обеспечения долговечности конструкций нефтегазопромысловой отрасли, в том числе предназначенных для эксплуатации в экстремальных климатических условиях Арктики, в настоящей работе были исследованы структура, фазовый состав и физико-механические и эксплуатационные свойства перспективной высокопрочной стали, применяемой при изготовлении нарезных труб нефтяного сортамента, эксплуатируемых в средах с повышенным содержанием сероводорода. Путем варьирования режимов термической обработки на образцах опытной марки стали были достигнуты свойства, соответствующие группам прочности С110 и Q125 по стандарту ISO 11960.

Проведен металлографический анализ и выявлены особенности структурообразования опытной стали. Показано, что даже незначительные изменения режимов термической обработки могут привести к существенным изменениям структуры и свойств стали. Это позволило, во-первых, реализовать различные механизмы упрочнения материала, а также сформировать структуру с различной морфологией структурных составляющих. Результаты проведенных испытаний на стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением в сероводородсодержащей среде по стандарту NACE TM0177 показали возможность применения данных высокопрочных сталей для производства нарезных труб нефтяного сортамента, используемых в кислых средах.

Исследования выполнены в рамках темы ГЗ № 0391-2016-0005, проекта УрО РАН № 18-10-1-20 и стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-150.2018.1. При выполнении работы использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

МЕТОД РАСЧЕТА РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ

Радченко В.П., Цветков В.В.

*Самарский государственный технический университет,
244, ул. Молодогвардейская, г. Самара, 443100, Россия,
e-mail: radch@samgtu.ru, vi.v.tsvetkoff@gmail.com*

Одним из способов повышения механических характеристик и продления срока службы металлических изделий является применение технологических методов поверхностного пластического упрочнения (дробеструйная обработка, обкатка роликом и др.). При этом в поверхностном слое детали наводятся сжимающие остаточные напряжения, препятствующие ее разрушению. Однако при повышенных температурах в упрочненной детали с течением времени происходит накопление деформации ползучести, что приводит к релаксации (уменьшению по модулю) остаточных напряжений. Таким образом, возникает необходимость в разработке методов оценки кинетики остаточных напряжений в процессе ползучести упрочненных деталей с учетом температурно-силовых режимов их эксплуатации.

В настоящей работе предложен метод расчета релаксации остаточных напряжений в сплошных и полых упрочненных цилиндрических изделиях при различных видах температурно-силового нагружения (действие осевой силы, крутящего момента, внутреннего давления, а также их различные комбинации). Методика расчета состоит из следующих этапов.

На первом этапе производится реконструкция полной картины напряженно-деформированного состояния цилиндрической детали после процедуры упрочнения с использованием экспериментально известной эпюры для окружной компоненты остаточных напряжений в поверхностном слое.

На втором этапе осуществляется расчет полей остаточных напряжений и полных деформаций при температурном нагружении упрочненной детали с температуры упрочнения до температуры при ползучести с учетом рассматриваемых внешних силовых факторов. Полученные таким образом функциональные зависимости играют роль начальных данных для расчета кинетики напряженно-деформированного состояния в процессе ползучести упрочненного цилиндра.

На третьем этапе при заданном начальном напряженно-деформированном состоянии осуществляется расчет ползучести, вследствие которой происходит перераспределение напряжений по радиусу цилиндра с течением времени. Расчет компонент тензора деформаций ползучести ведется численно, «шагами» по времени. В качестве реологической модели в настоящей работе используется энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности. Для идентификации всех параметров данной реологической модели необходимо иметь лишь экспериментальные стационарные кривые ползучести при одноосном растяжении.

На последнем этапе методики осуществляется расчет характеристик напряженно-деформированного состояния после силовой и температурной разгрузки.

Проверка адекватности предложенной методики выполнена с использованием экспериментальных данных по кинетике остаточных напряжений для сплошных образцов из жаропрочных сплавов ЖС6УВИ (при $T = 675$ °С) в условиях термоэкспозиции (температурной выдержки без механических нагрузок) и сплава ЖС6КП (при $T = 800$ °С) при воздействии растягивающей нагрузки. Получены эпюры релаксации напряжений при данных видах нагружения. Наблюдается соответствие между расчетными и экспериментальными данными.

Выполнен детальный теоретический анализ влияния геометрических параметров, силовых факторов и реологических свойств материала на характер релаксации остаточ-

ных напряжений вследствие ползучести. Показано, что при комбинированном нагружении упрочненного цилиндра осевой силой, крутящим моментом и (или) внутренним давлением происходит релаксация всех компонент тензора напряжений с течением времени t . При этом на стадии установившейся ползучести в асимптотическом случае (при $t \rightarrow +\infty$) к моменту окончания процесса ползучести происходит практически полная релаксация остаточных напряжений, что также свидетельствует об адекватности предложенной методики расчета.

Полученные результаты могут быть использованы в различных промышленных комплексах, в частности в авиадвигателестроении и машиностроении для оценки остаточного ресурса упрочненных деталей в условиях высокотемпературной ползучести.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-01-00249-а).

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНОЙ ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД

Резников Д.О.

*Институт машиноведения РАН, Малый Харитоньевский пер., д. 4, Москва, Россия, 101990,
email: mibsts@mail.ru*

Понятие прочностной живучести сложной технической системы (далее СТС) является центральным при анализе ее поведения после того, как в ней возникают локальные повреждения. Системы, обладающие высокой живучестью, разрушаются постепенно, сохраняя при этом ограниченную работоспособность. Это позволяет оператору системы принять защитные меры (провести ремонт, замену поврежденных элементов, перевести систему в безопасный режим эксплуатации, выполнить аварийный останов и т. д.), тем самым сводя последствия аварии главным образом к первичным ущербам от повреждения элементов системы. Системы с малой живучестью разрушаются резко и катастрофически, что сопровождается значительными вторичными и каскадными разрушениями, которые являются несоразмерными (непропорциональными) иницилирующим воздействиям и вызванными ими первичным повреждениям.

Накопление повреждений и разрушение СТС представляет собой иерархически организованный процесс, который развивается по всей иерархии масштабов, начиная от наномасштабов, соизмеримых с межатомными расстояниями, вплоть до макроскопического масштаба, определяемого структурой системы в целом.

На основании моделей и методов, разработанных в рамках таких дисциплин как физика прочности, физическая мезомеханика, механика накопления повреждений, механика разрушения, теория надежности, теория систем, механика катастроф, было показано, что для обеспечения адекватных результатов моделирования процессов накопления повреждений и разрушения, а в ряде случаев и для получения достаточно точных количественных оценок, явный одновременный учет всего множества масштабов является избыточным и для описания указанных процессов вполне достаточно трех масштабных уровней:

- мезоуровня, который интегрально учитывает более мелкие масштабы и характеризует физико-механические свойства конструкционного материала;
- макроуровня, описывающего процессы накопления повреждений и разрушение отдельных конструктивных элементов с учетом макродефектов (элементный уровень);
- макроуровня, характеризующего последовательность разрушения в сопряженных элементах и системе в целом (системный уровень).

Таким образом, в простейшей постановке при современных методах технической диагностики (металлография, дефектоскопия, дефектометрия) можно ограничиться рассмотрением процессов разрушения на трех масштабных уровнях: 1) мезоуровне – накопление рассеянных повреждений в материале и разрушение мезообъемов; 2) элементном (локальном) уровне – развитие макродефектов и разрушение на уровне конструктивных элементов; 3) системном (глобальном) уровне – последовательность разрушений конструктивных элементов, приводящая к разрушению системы в целом. При этом процессы, протекающие на нано-, микро- и мезоуровне, учитываются через механические характеристики конструкционных материалов. В соответствии с выделенными уровнями могут быть сформированы и три уровня оценки живучести: 1) живучесть (стойкость) конструкционного материала; 2) живучесть конструктивных элементов системы; и 3) структурная живучесть системы в целом.

В докладе будет представлена совокупность индексов живучести, основанных на детерминистических и вероятностных оценках прочности системы в поврежденном состоянии, а также на интегральных подходах, базирующихся на проведении риск-анализа системы, заключающемся в проведении качественного и количественного исследования структуры сценариев эскалации аварии. Использование индекса живучести, базирующегося на проведении риск-анализа рассматриваемой сложной технической системы, позволяет в наиболее полной мере учесть многовариантность сценариев разрушения.

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ОБРАЗЦА ТИТАНА ВТ1-00

Реков А.М.¹, Вичужанин Д.И.²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Институт материаловедения и металлургии,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: arekov@yandex.ru

²Институт машиноведения, Уральское отделение РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: mmm@imach.uran.ru

Методом корреляции цифровых изображений определены упругопластические деформации поверхностного слоя образца. В качестве опорных меток использовали деформационный рельеф, возникающий на поверхности образца при растяжении. Испытания проведены при одноосном растяжении плоских образцов. Материал образцов – чистый титан марки ВТ1-00. Поля векторов необратимых смещений определены в области равномерной деформации образцов. [3, 4].

Титан марки ВТ1-00 имеет гексагональную кристаллическую решетку. Материал однофазный (α -фаза). Пластические деформации в поверхностном слое образца, как и в материалах с другими решетками, образуют случайные тензорные поля. Характеристиками таких полей служат моменты распределения и плотности распределения деформаций [5, 6]. Рассчитаны величины главных логарифмических деформаций и их интенсивность. Определены коэффициенты Надаи–Лоде, характеризующие напряженно-деформированное состояние отдельных участков поверхности образца. Плотности распределения главных логарифмических деформаций и их интенсивность отличаются от нормального распределения Гаусса. Плотности распределения коэффициентов Надаи–Лоде являются двумодальными. Это обусловлено тем, что при растяжении образца титана преимущественно реализуются два деформационных процесса: а) скольжение, б) двойникование. Результаты работы могут служить в качестве дополнительных критериев при анализе деформационных процессов, протекающих при одноосном растяжении титана.

Ключевые слова: плотность распределения, тензор пластических деформаций, напряженно-деформированное состояние, зерно поликристалла, статистический анализ.

Выводы

1. Определены компоненты ε_{xy} , ε_{yy} и ε_{xx} тензора пластических деформаций при одноосном растяжении плоского образца из чистого титана марки ВТ-00.
2. Рассчитаны величины главных деформаций локальных участков на поверхности образца титана ВТ1-00 при одноосном растяжении.
3. Определены параметры плотности распределения главных деформаций и их интенсивность на различных этапах растяжения образца.
4. Выполнена оценка напряженно-деформированного состояния различных участков поверхности образца.
5. Результаты работы могут быть использованы в качестве дополнительных критериев при анализе деформационных процессов, протекающих при одноосном растяжении титановых образцов.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИМАШ УрО РАН (№ 0391-2016-0004). Испытания проведены с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» Института машиноведения УрО РАН.

Литература

1. Вайнштейн А. А., Алехин А. Н. Основы теории упругости и пластичности с учетом неоднородности материала. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2004. – 236 с.
2. Реков А. М., Вайнштейн А. А., Березин В. В. Распределение главных микродеформаций // Вестник УГТУ-УПИ. Механика микронеоднородных материалов и разрушение : сборник научных трудов. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. – № 22 (52). – С. 85–88.
3. Sutton M. A., Orteu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.
4. Экспериментальная механика: в 2-х кн. Кн. 1 / пер. с англ.; под ред. А. Кобаяси. – М. : Мир, 1990. – 616 с.
5. Вайнштейн А. А., Реков А. М. Определение предельной равномерной деформации титана по диаграмме деформирования // Вестник УГТУ-УПИ. Конструирование и технология изготовления машин : сборник научных трудов : в 2-х ч. Ч. 1. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005. – № 18 (70) – С. 218–221.
6. Реков А. М. Функции распределения напряженно-деформированных состояний микроструктуры поликристаллов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80, № 2.– С. 26–31.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МАРТЕНСИТА В ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ, МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Муравьев В.В.¹, Муравьева О.В.¹, Ригмант М.Б.², Корх М.К.²,
Петров К.В.¹, Башарова А.Ф.¹

¹ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»,
7, Студенческая, Ижевск, Россия, 426069, e-mail: vmuraviev@mail.ru

²ФГБУН Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
18, С. Ковалевской, Екатеринбург, Россия, 620108, e-mail: rigmant@imp.uran.ru

Аустенитные хромоникелевые стали находят широкое применение в промышленности благодаря высоким эксплуатационным свойствам. В процессе эксплуатации при воздействии высоких или низких температур и пластических деформаций могут происходить фазовые превращения вследствие распада аустенита (γ -фаза) с образованием мартенсита деформации (α' -фаза), ухудшающей механические свойства и коррозионную стойкость стали, или с образованием фазы мартенсита охлаждения, влияние которой на процессы охрупчивания не столь критичны. Поэтому разработка методов неразрушающего контроля (НК), позволяющих определять фазовый состав аустенитных сталей хромоникелевого класса в процессе их изготовления и эксплуатации изделий из них является актуальной и востребованной задачей. Среди методов оперативной оценки структуры материалов и изделий успешно применяются методы акустической и магнитной структуроскопии. Благодаря ярко выраженным ферромагнитным свойствам для данного класса материалов возможно использование бесконтактного электромагнитно-акустического (ЭМА) метода возбуждения-приема акустических волн, а также метода магнитного насыщения. Дополнительный интерес представляет исследование удельного электрического сопротивления от фазы мартенсита.

В работе образцы из стали 09X17H5Ю-ВИ цилиндрической формы диаметром 7 мм и длиной 60 мм вырезали из заготовок, которые охлаждали в жидком азоте и подвергали пластической деформации холодной прокаткой в несколько проходов. Содержание мартенсита в образцах от 1 до 30 % соответствовало мартенситу деформации, а от 39 до 83 % – мартенситу охлаждения. Используемый при исследованиях ЭМА зеркально-теневой метод многократных отражений основан на вводе-приеме акустических продольных и поперечных волн с осевой поляризацией, распространяющихся по радиальным направлениям в сечении образца. Информативными параметрами при исследованиях являются скорости акустических волн, определяемые с погрешностью не более 0,1 %, а также амплитуда акустического сигнала, пропорциональная эффективности ЭМА-преобразования. Используемый метод магнитного насыщения, основанный на определении намагниченности насыщения, обеспечивает относительную погрешность 3÷5 %.

Результаты измерений акустических и магнитных параметров показали рост эффективности ЭМА-преобразования с увеличением фазы мартенсита, более ярко выраженный в случае мартенсита деформации и тенденцию к снижению скорости продольных и поперечных волн в области роста содержания мартенсита деформации, имеющего речную структуру. Также наблюдается увеличение скорости объемных волн при увеличении процентного состава мартенсита охлаждения (39–83 %), плотность дислокаций в котором на 2 порядка меньше. Зависимость индукции насыщения и удельного электрического сопротивления от содержания мартенсита близка к линейной вне зависимости от его морфологии.

Исследования проведены за счет государственной темы «Диагностика».

СПЕКАНИЕ ПОРОШКА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОЛОКИ

Родкевич Н.Г., Глазкова Е.А., Первиков А.В., Апкарьян А.С., Лернер М.И.

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения

Российской академии наук, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия,

e-mail: ngradk@ispms.tsc.ru, eagl@ispms.tsc.ru, pervikov@list.ru, asakt@ispms.tsc.ru, lerner@ispms.tsc.ru

Перспективным направлением аддитивных технологий является разработка материалов представляющих собой бимодальные металлопорошковые композиции с заданным соотношением нано- и микрочастиц. Наночастицы, занимая поровое пространство между микрочастицами, обеспечивают равномерное спекание материала при температуре ниже температуры плавления металла, снижают усадку, деформацию, пористость и шероховатость детали. Снижение температуры и равномерное спекание, повышение точности изготовления и снижение шероховатости обеспечивают минимальный угар материала детали. Перспективный метод получения бимодальных порошков металлов и сплавов – электрический взрыв проволоки, который позволяет регулировать массовую долю нано- и микрочастиц и их размеры.

Хромоникелевая аустенитная нержавеющая сталь 316L – один из самых распространенных материалов в аддитивных технологиях. Нержавеющая сталь 316L широко применяется в различных отраслях промышленности благодаря ее хорошей коррозионной и окислительной стойкости.

Цель работы – исследование процесса спекания бимодальных порошков нержавеющей стали 316L, полученных электрическим взрывом проволок.

Исследуемые порошки нержавеющей стали 316L представлены нано- и микрочастицами сферической формы. Размер наночастиц лежит в диапазоне 70–100 нм, микрочастиц – 1,3–1,9 мкм. Обнаружено, что наночастицы частично распределены по поверхности микрочастиц, частично заполняют пространство между микрочастицами, а также образуют агломераты. Порошки характеризуется равномерным распределением элементов.

Порошок нержавеющей стали прессовали в форме дисков методом холодного одноосного компактирования и спекали методом свободного спекания в вакуумной печи с молибденовыми электродами в интервале температур 400–1350 °С. При спекании диски подвергаются усадке, но при этом не растрескиваются. Искажения формы диска и деформации его не происходит, что говорит об изотропности структуры диска. Дилатометрическое исследование процесса спекания показало, что спекание порошка протекает в две стадии. Первая стадия спекания наблюдается до 800 °С, максимальная скорость спекания отмечается при температуре 846 °С. Температура начала спекания на второй стадии – 1050 °С, а максимальная скорость спекания отмечается при 1150 °С. Относительная плотность достигает 0,99 при 1350 °С. Это подтверждается электронно-микроскопическими исследованиями структуры спеченных образцов. Установлено, что при температуре 800 °С наночастицы большей частью спечены и деформированы, однако микрочастицы в основном сохраняют свою структуру. Образцы, спеченные при температуре 1000–1350 °С, показывают полное изменение микроструктуры, зерно имеет форму многогранника, что свидетельствует о полном завершении процесса спекания. При увеличении температуры спекания увеличение относительной плотности, прочности образцов имеет сигмоидный характер.

Таким образом, применение бимодальных порошков металлов, полученных методом электрического взрыва проволок, позволяет снизить температуру спекания порошков нержавеющей стали, увеличить скорость спекания. Спекание порошков нержавеющей стали при 1350 °С позволяет получать образцы с плотностью до 99 % от теоретической.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.604.21.0158, идентификационный номер проекта RFMEFI60417X0158).

О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ЗНАКОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГИМИ ВОЛНАМИ

Иляхинский А.В., Родюшкин В.М., Никитина Е.А.

*Институт проблем машиностроения РАН –
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,
85, ул. Белинского, Нижний Новгород, 603024, Россия,
e-mail: nikitina_ea@pochta.ru*

Традиционно для оценки прочности и долговечности конструкционных материалов методами неразрушающего контроля широко используются акустические методы. При этом наиболее полно развиты методики, использующие эффект изменения скорости сдвиговой и продольной волны в процессе нагружения конструкционного материала [1]. К недостаткам указанных методик следует отнести сложность их применения для массивных конструкций, а также для тонкостенных конструкций с возможной шероховатостью внутренней поверхности.

В работе [2] применительно к ряду конструкционных материалов и сплавов детально изучено изменение скорости поверхностных Рэлеевских волн во время растяжения плоских образцов. Показано, что зависимость скорость–деформация носит стадийный характер и существенно зависит от структуры металла. Вместе с тем большинство экспериментальных исследований посвящено изучению влияния одноосного растяжения на скорость распространения упругой волны в упругой области и влиянию поврежденности материала [3], меньше таких работ при пластическом деформировании и при этом практически отсутствуют работы о влиянии сжимающих напряжений.

Цель работы – определение закономерности распространения волны Рэлея при одноосном растяжении как в упругой, так и в пластической области, а также при действии сжимающих напряжений в стали Ст3.

Экспериментально установлено, что зависимость скорости распространения поверхностной волны от напряженного состояния вдоль всей кривой деформирования имела нелинейный сложный характер. В упругой области деформирования Ст3 при растяжении с увеличением нагрузки скорость упругой волны увеличивалась, а при пластическом деформировании скорость уменьшалась. При сжатии в упругой области скорость волны Рэлея уменьшалась, причем несимметрично по сравнению с растяжением. На основе полученных результатов получены эмпирические константы и сформулированы соотношения связи скорости распространения упругой волны и действующих напряжений при одноосном растяжении–сжатии.

К практической значимости представленной работы следует отнести возможность на основе полученных соотношений выполнить адекватную оценку результатов неразрушающего контроля акустическими методами с определением знаков деформирования, а также зафиксировать появление пластических деформаций.

Работа выполнена в рамках проекта № 18-08-00715А Российского фонда фундаментальных исследований.

Литература

1. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / А. Л. Углов, В. И. Ерофеев, А. Н. Смирнов / отв. ред. Ф. М. Митенков. – М. : Наука, 2009. – 229 с.
2. Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Лунев А. Г. О возможности оценки прочности металлов и сплавов неразрушающим ультразвуковым методом // ПМТФ. – 2002. – Т. 43, № 1. – С. 202–204.
3. Дисперсия и затухание акустической волны, распространяющейся в поврежденном материале / В. И. Ерофеев, Е. А. Никитина, П. А. Хазов // Приволжский научный журнал. Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – 2014. – № 4. – С. 22–28.

ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН РЕЛЕЯ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 3

Иляхинский А.В., Родюшкин В.М., Никитина Е.А.

*Институт проблем машиностроения РАН –
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,
85, ул. Белинского, Нижний Новгород, 603024, Россия,
e-mail: ilyahinsky-aleks@bk.ru*

Цель работы – исследовать изменение скорости упругих поверхностных волн Рэлея в зависимости от степени деформации Стали 3.

Измерения проводились на плоских пропорциональных образцах по ГОСТ 1497 из стали Ст3 толщиной 8 мм шириной рабочей части 20 мм. Испытания на растяжение проводилось на универсальной испытательной машине фирмы Tinius Olsen Ltd, модель H100KU. Поверхностная волна Рэлея создавалась пьезоэлектрическими преобразователями на частотах колебаний 2, 5, и 10 МГц. Излучающий и приемный ПЭП устанавливались друг от друга на фиксированном расстоянии, равном 50 мм. Возбуждение излучающего ПЭП осуществлялось с помощью дефектоскопа А1214. С приемного ПЭП сигнал поступал на измеритель временных интервалов, в качестве которого использовался осциллограф Tektronix TDS2022 с разрешением по времени 2 нсек. Направление распространения импульсов – вдоль образца.

На рисунке приведен график зависимости от величины деформации напряжения и величины задержки (скорости) упругой волны Рэлея.

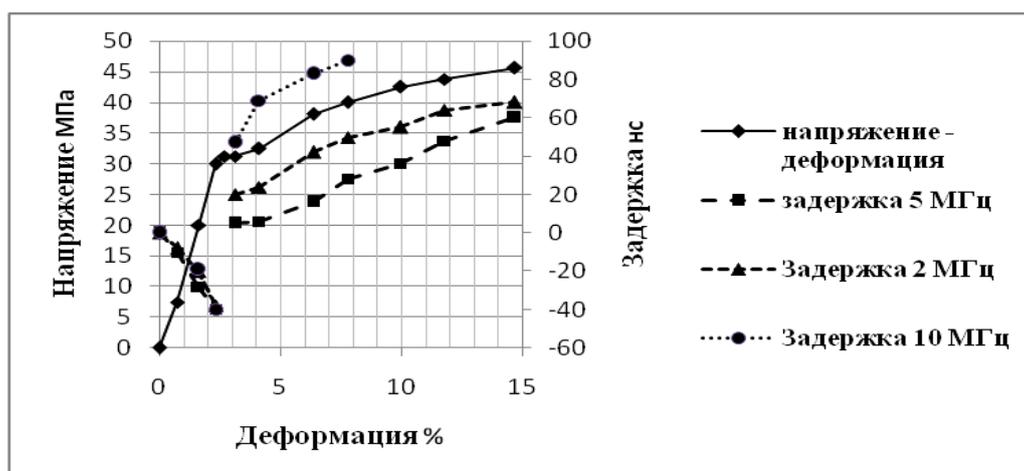


График зависимости от величины деформации напряжения и величины задержки упругой волны Рэлея

Как видно из приведенного рисунка в области упругой деформации при растяжении с увеличением деформации задержка линейно уменьшается (скорость упругой волны увеличивается). В области пластической деформации $\epsilon > 2\%$ зависимость скорости упругой волны Рэлея имеет сложный нелинейный характер и уменьшается с увеличением деформации. Это свидетельствует о том, что теоретические модели, описывающие эффект акустоупругости, при пластической деформации не работают. Изменение задержки в области упругости не зависит от частоты зондирующего импульса. В области пластической деформации прослеживается значимая зависимость скорости от частоты. Этот факт может быть использован при выяснении, в какой области по уровню деформаций находится конструкция, прежде чем приступить к оценке ее деформации по результатам измерения скорости волн.

Работа выполнена в рамках проекта №18-08-00715А Российского фонда фундаментальных исследований.

THE FORMATION OF THE STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF AN ELECTRIC EXPLOSIVE WEAR-RESISTANT COATING AFTER ELECTRON BEAM PROCESSING

Romanov D.A., Sosnin K. V., Gromov V.E., Filyakov A.D.,
Ysova A.V., Boykova A.V.

Siberian State Industrial University, 42 Kirova St., Novokuznetsk, 654007, Russia,
e-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru

One of the main factors limiting the service life of the machine parts of different purposes is their mechanical wear. The failure of machine parts is mostly caused by the local wear of working surfaces in the sites of their intensive interaction with the working environment or mating part. Creation of new bulk three-dimensional composite materials, being the main way of increasing the reliability and durability of mechanism and machine parts, is becoming more problematic due to the deficit and high price of composite additives. It is established by SEM that, after EES of coatings of the systems under study, a number of morphological relief features are formed on the surface. Among them there are numerous deformed crystallized microglobules with representative diameters from 1 to 50 nm fallen out from the rear of the jet and distributed nonuniformly. The microglobules are formed by the metal and powder particles used for EES. The influxes caused by the radial flow of metal from the center of the spraying spot to the periphery, microcraters, microcracks. In the present research, coatings of the TiC-Mo, TiC-Ni, TiB₂-Mo, and TiB₂-Ni systems were applied to the surface of the Hardox 450 steel by the method of electrospray coating. After that, the electron-beam processing of the coatings was carried out. It is established that, after electroexplosive spraying of the coatings of the systems under investigation, a number of morphological features of relief are formed on the surface, which are deformed crystallized microglobules, influxes, microcraters, microcracks, layers. After the electron-beam processing of the coatings, the microglobules, microcraters and microcracks disappear on their surfaces, a polycrystalline structure is formed, in the bulk of which the structure of cellular crystallization is observed. The roughness of the coatings after electron beam processing is 1.1...1.2 μm. It is established that the thickness of the layers of electrically explosive coatings modified by an electron beam, depending on the surface energy density, is linear. Its maximum value is observed for the TiB₂-Mo system, the minimum one being characteristic of the TiC-Ni system, and this is explained by their thermophysical properties. The following substructures are revealed in the coatings: cellular, band, fragmented, subgrain, as well as grains with chaotically distributed dislocations and dislocations that form nets. The electron beam processing of coatings leads to the formation of a composite filled structure throughout the entire section of the remelted layer, the formation of a more dispersed and homogeneous structure in it than that in the coatings without electron beam processing. The dimensions of titanium carbide or titanium diboride in inclusions in the molybdenum or nickel matrix are reduced by a factor of 2–4 compared with their dimensions immediately after electroexplosive spraying. Particles of the second phases are found in the volume of molybdenum or nickel grains and at the boundaries, namely, titanium carbide or titanium diboride.

This work was supported in part by a grant from the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists having Candidate of Sciences degrees (project no. MK-1118.2017.2) and by the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 16-32-60032 mol_a_dk, 18-32-00075 mol_a).

ГАЗОПРОВОДЫ ДАВЛЕНИЕМ ДО 1,2 МПА ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Федоров Ю.Ю., Саввина А.В., Васильев С.В.

*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН,
ул. Автодорожная, 20, г. Якутск, 677007, Россия
e-mail: yuristan@yandex.ru, io1982@mail.ru, spira_ira_vas@mail.ru*

Полимерные трубы нашли широкое применение во всех отраслях промышленности и хозяйства благодаря уникальному комплексу физико-механических свойств. Однако их внедрение в регионы с экстремальными климатическими условиями по-прежнему ограничено. Это вызвано рядом факторов, среди которых можно выделить малую изученность особенностей разрушения полимерных труб в условиях низких климатических температур. В настоящее время полиэтиленовые трубы широко применяются в Республике Саха (Якутия) для сооружения газопроводов на давление до 0,6 МПа. Однако все острее встает вопрос о создании газораспределительных сетей на давление 1,2 МПа. Сооружение таких трубопроводных систем позволит существенно снизить затраты на сырье, монтаж и обслуживание газопроводов. Поэтому возникает необходимость рассмотреть возможность применения армированных полимерных труб (АПТ). АПТ в свою очередь имеют свои конструктивные особенности и их механическое поведение в условиях холодного климата и многолетнемерзлых грунтов в настоящее время малоизучено.

В данной работе в качестве объектов исследования использовали АПТ двух марок: тип I – производства «Технология композитов», тип II – производства «Запсибтехнология». АПТ производства «Технология композитов» конструктивно состоят из трех слоев: внутреннего, формируемого методом экструзии из полиэтилена марки ПЭ80 или ПЭ100; силового каркаса из высокопрочных синтетических нитей, намотанных в направлении максимальных напряжений; наружного слоя, также формируемого из полиэтилена методом экструзии. АПТ производства «Запсибтехнология» состоит из внутреннего и внешнего слоев из полиэтилена марки ПЭ80 и промежуточного – армирующего, состоящего из двух слоев арамидных нитей, покрытых технологическим слоем, адгезионно связанным с внутренней и внешней оболочкой трубы.

Для оценки несущей способности АПТ в условиях холодного климата в соответствии с ГОСТ были исследованы исходные модельные образцы, а также образцы свидетели, после длительной эксплуатации на опытном участке газопровода. Проводились мониторинговые исследования трубопровода из армированной полиэтиленовой трубы подземного заложения на участке опытно-промышленного газопровода с рабочим давлением 1,2 МПа.

В результате исследований выявлены зависимости кратковременной прочности армированных полиэтиленовых труб от скорости деформирования и конструктивных особенностей трубы, заключающиеся в повышении температуры вязко-хрупкого перехода и возникновении хрупкой трещины в трубах с технологическим слоем, имеющим хорошую адгезию с внешними оболочками трубы. Осуществлена оценка несущей способности армированных полиэтиленовых труб при низких температурах и определены низкотемпературные пределы, ограничивающие применение полиэтиленовых труб. Получены данные по мониторинговым исследованиям, показывающие возможность уменьшения глубины заложения трубопровода в зависимости от геокриологических испытаний и материала трубы. Исследованы деформационно-прочностные свойства образцов-свидетелей, изъятых после продолжительной эксплуатации из участка опытно-промышленного газопровода, физико-механические характеристики трубы после эксплуатации в течение 10 лет не изменились. Уровень адгезии между слоями снизился, о чем свидетельствует неизменное значение температуры возникновения хрупкой трещины с повышением скорости деформирования. По полученным результатам установлена эффективность применения армированных полиэтиленовых труб в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СПЛАВА АМГ6 ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

Савельева Н.В.¹, Баяндин Ю.В.¹, Савиных А.С.², Гаркушин Г.В.²,
Разоренов С.В.², Наймарк О.Б.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, 1, ул. Ак. Королева, Пермь, 614013, Россия,

²Институт проблем химической физики РАН,

1, пр. Ак. Семенова, Московская обл., г. Черноголовка, 142432, Россия,

e-mail: saveleva@icmm.ru

Представленная работа является экспериментально-теоретическим изучением закономерностей формирования упруго-пластического фронта и откольного разрушения в алюминиевом сплаве АМГ6 при ударном сжатии. Исследование предполагает анализ оригинальных экспериментальных профилей скорости свободной поверхности и численное моделирование процесса деформирования и разрушения сплава АМГ6.

Моделирование проводится на основе статистико-термодинамического подхода, который описывает эволюцию среды с дефектами. В рамках данного подхода были сформулированы уравнения связи релаксационных свойств и накопления поврежденности материала в ходе деформирования. В работе численно решается задача высокоскоростного соударения плоских образцов, исследуется процесс релаксации упругого предвестника, изменение величины откольной прочности. Идентификация параметров модели проводится по результатам испытаний в широком интервале скоростей деформации. Для верификации модели численные расчеты сравниваются с экспериментальными данными ударно-волнового нагружения.

Для проверки адекватности модели проводится экспериментальное исследование поведения алюминиевого сплава АМГ6 при ударно-волновом нагружении. В результате численного моделирования построены волновые профили скорости свободной поверхности. Моделирование процесса позволяет в рамках выбранного подхода описать формирование упруго-пластического фронта и «откольного импульса» в волне разгрузки. На основе полученных данных проводится исследование эффектов, наблюдаемых при ударно-волновом нагружении. Определенная из численных расчетов зависимость величины динамического предела упругости от расстояния, на которое волна распространилась, позволяет оценить релаксацию упругого предвестника. Откольное разрушение отражается на профиле скорости свободной поверхности в виде формирования откольного импульса и последующей реверберации волн по откольной пластине. На основе развитых представлений об особенностях кинетики поврежденности в условиях специального типа метастабильности неравновесного термодинамического потенциала твердого тела с дефектами показано, что в исследуемом материале откольной прочности слабо зависит от скорости деформации.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2439.2017.1).

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РОСТА ТРЕЩИНЫ С УЧЕТОМ ЕЕ ЗАКРЫТИЯ И ВЛИЯНИЯ МЕСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Савкин А.Н., Сундер Р., Денисевич Д.С., Седов А.А., Бадиков К.А.

*Волгоградский государственный технический университет,
д. 28, пр. Ленина, Волгоград, 400005, Россия,
e-mail: tfpic@vstu.ru*

В настоящее время среди моделей прогнозирования роста трещины более популярны модели закрытия трещины, учитывающие уменьшение размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН), связанного с асимметрией циклического нагружения. Одним из недостатков этих моделей является невозможность учета последовательности в истории нагружения.

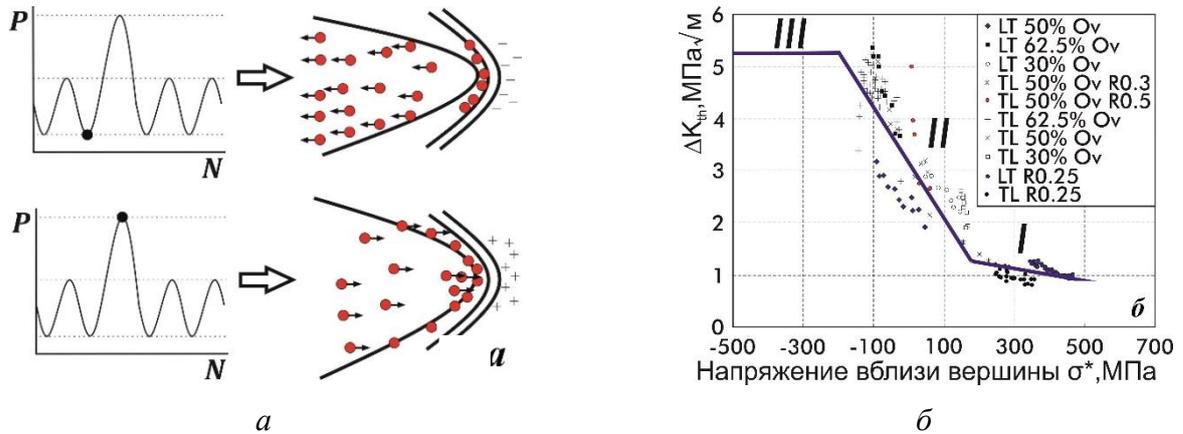


Рис 1. Схема модели Сундера

Модель трещиностойкости, разработанная Р. Сундером, учитывающая местные напряжения в вершине трещины объясняет природу замедления трещины на основе отложения активных частиц из влаги у вершины трещины и их скопления в наиболее напряженных объемах при росте нагрузки, что сказывается на зависимости порогового КИН $K_{th} = f(\sigma^*)$ от напряжения вблизи трещины. Теория связала величину порогового размаха КИН ΔK_{th} и местных напряжений вблизи вершины трещины, наводимой перегрузками, и постулировала, что эффект перегрузки в околупороговой области скоростей роста вызывается и остаточными местными напряжениями (рис. 1 б). Предлагаемая модель применяет подход учета местных напряжений и деформаций для оценки напряжения σ^* в области концентратора напряжений.

Используя уравнения Нойбера и Рэмберга–Осгуда, можно связать КИН K или его размах ΔK с местным напряжением σ^* на удалении от вершины трещины r^* для монотонного и циклического нагружений соответственно:

$$K = \sqrt{2\pi \cdot r^* \cdot E \cdot \sigma^* \cdot \left(\frac{\sigma^*}{E} + \left(\frac{\sigma^*}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right)}, \quad (1)$$

$$\Delta K = \sqrt{2\pi \cdot r^* \cdot E \cdot \Delta \sigma^* \cdot \left(\frac{\Delta \sigma^*}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma^*}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right)}. \quad (2)$$

Дальнейшее развитие модели связано с учетом переменного характера порогового размаха КИН ΔK_{th} . За основу была принята формула Формана–Метту, описывающая КДУР на всех трех участках изменения скоростей роста усталостной трещины. Была проведена серия испытаний из трех регулярных нагружений на компактных образцах из алюминиевого сплава 2024-T3 с нагрузкой $P_{max} = 2$ кН, частотами нагружения $F = 5$ Гц при записи данных $F_{DAQ} = 2500$ Гц и асимметриями цикла $R_1 = 0,1$; $R_2 = 0,3$ и $R_3 = 0,5$. При известном размахе КИН ДК для каждого полуцикла по формуле (2) определяли значение местного напряжения σ^* на удалении от вершины трещины r^* , а на основании аналитической зависимости $K_{th} = f(\sigma^*)$ оценивали пороговый КИН, подставляя его в уравнение (3), результаты представлены на рис. 2. Таким образом, при прогнозировании усталостной долговечности история нагружения позволяла определить ΔK_{eff} , K_{max} и K_{th} на каждом цикле. Ниже приведено уравнение, предлагаемое для расчета скорости роста усталостной трещины.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_{eff}^n \cdot \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_{eff}}\right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c}\right)^q}. \quad (3)$$

Суммирование приращений длин трещин на каждом цикле или в результате каждого повторения истории нагружения позволяет определить долговечность (4). Взаимосвязь полученных значений долговечности и расчетных показана на рис. 3.

$$N_f = \frac{a_f - a_0}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{da}{dN}\right)_{ij}}, \quad (4)$$

где a_f – критическая длина трещины; a_0 – начальная длина; n – число циклов истории нагружения; m – число повторений истории нагружения; $(da/dN)_{ij}$ – скорость роста трещины и приращение на i цикле j повторения истории нагружения.

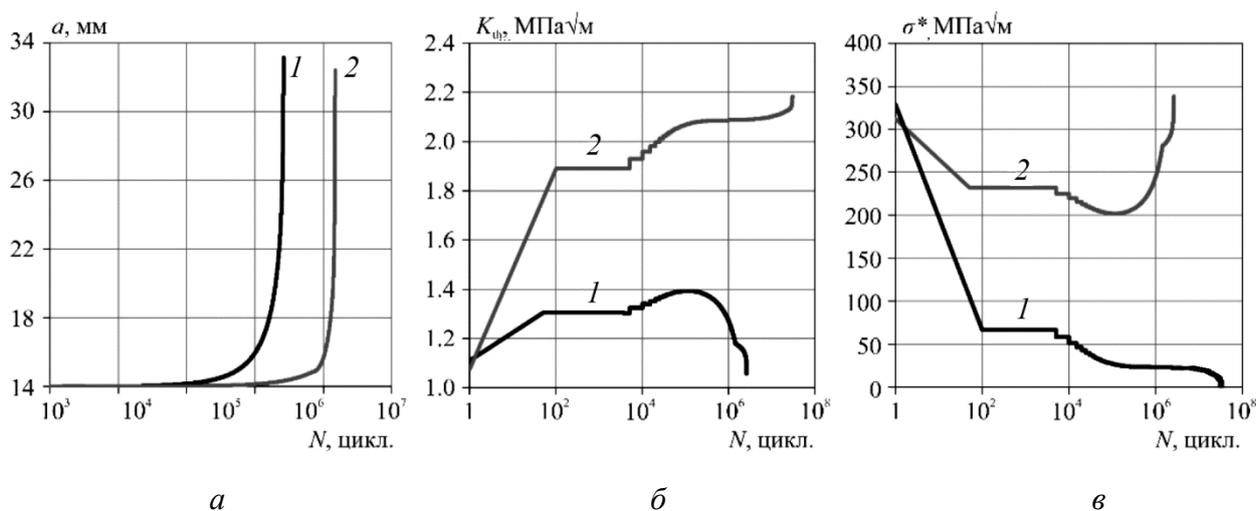


Рис. 2. Кривые роста усталостной трещины (а), изменение порогового КИН K_{th} (б), локального напряжения σ^* (в) при перегрузке–недогрузке (1) и недогрузке–перегрузке (2)

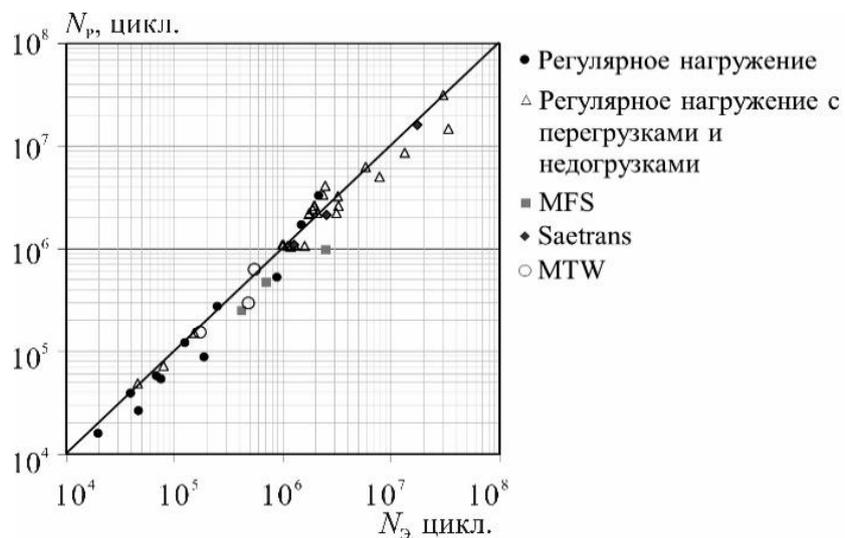


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных продолжительности роста усталостных трещин для алюминиевого сплава 2024-T3

Математическое моделирование продолжительности роста усталостной трещины, особенно в околопороговой области ее роста, по модели Сундера показало (рис. 3), что для исследованного алюминиевого сплава 2024-T3 выявлена чувствительность роста трещины к различным видам силового воздействия, в том числе и разному характеру случайного нагружения.

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ КОНТАКТНОМ НАГРУЖЕНИИ НАПЛАВЛЕННОГО ЛАЗЕРОМ ПОКРЫТИЯ ПГ-10Н-01, ПОДВЕРГНУТОГО ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Саврай Р.А., Макаров А.В., Горкунов Э.С., Соболева Н.Н., Коган Л.Х.,
Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л.

*Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия,
e-mail: ras@imach.uran.ru,*

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Россия*

В процессе лазерной наплавки хромоникелевых покрытий в результате ускоренного охлаждения наплавляемого металла по механизму теплопроводности (со скоростями до 10^3 – 10^4 °С/сек) формируются метастабильные структурные состояния, характеризующиеся наличием пересыщенного твердого раствора и относительно дисперсных частиц упрочняющих фаз. Это может свидетельствовать о возможности улучшения их свойств дополнительной термической обработкой, что подтверждается литературными данными. Наши исследования показали, что высокотемпературный стабилизирующий отжиг при температуре 1000–1050 °С способствует резкому повышению твердости и трибологических свойств покрытия ПГ-10Н-01 до уровней, соответствующих (или превышающих) характеристики данного покрытия после лазерной наплавки. Вместе с тем, сформированное таким способом покрытие обладает термической стабильностью и, как следствие, сохраняет повышенные значения твердости и абразивной износостойкости при нагреве вплоть до температуры стабилизирующего отжига. Однако дополнительная термическая обработка наплавленного покрытия также может приводить и к его охрупчиванию, которое экспериментально наблюдалось в ряде исследований. Поэтому актуальной задачей является исследование контактной выносливости и возможностей контроля усталостной деградации покрытий, сформированных комбинированной лазерно-термической обработкой.

Цель настоящей работы – изучение возможностей вихретокового метода для контроля усталостной деградации при контактном нагружении полученного методом газопорошковой лазерной наплавки покрытия ПГ-10Н-01, подвергнутого дополнительному высокотемпературному отжигу при 1025 °С в течение 2 ч (охлаждение с печью). Механические испытания на контактную усталость проводили по схеме пульсирующего неударного контакта «шар–плоскость» на базе $N = 10^6$ циклов нагружения. Измерения электромагнитных параметров полученного лазерной наплавкой композиционного покрытия выполняли на лабораторном макете вихретокового прибора с использованием дифференциально включенного накладного трансформаторного преобразователя с ферритовым сердечником броневого типа на частотах $f = 36, 72; 96$ и 120 кГц.

Установлены возможности контроля вихретоковым методом усталостной деградации при контактном нагружении полученного методом газопорошковой лазерной наплавки покрытия ПГ-10Н-01, подвергнутого дополнительному высокотемпературному отжигу при 1025 °С. Показано, что контроль вихретоковым методом усталостной деградации при контактном нагружении покрытия ПГ-10Н-01 после высокотемпературного отжига имеет определенные ограничения, обусловленные повышенной хрупкостью данного покрытия. При этом возможен контроль только резкого роста размера контактных повреждений, который при данных условиях нагружения происходит при 8×10^5 циклов и обусловлен образованием большого количества периферийных кольцевых трещин в зоне разрушения и соответствующим снижением показаний вихретокового прибора б вследствие роста удельного электросопротивления покрытия. Контроль может проводиться измерениями показаний вихретокового прибора на больших частотах возбуждения вихретокового преобразователя ($f = 72$ – 120 кГц), когда степень влияния ферромагнитной стальной основы на показания вихретокового прибора б минимальна.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ФАНО России по темам № 01201463331 и № 01201463329.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЫВУ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА

Саврай Р.А., Макаров А.В.

*Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия,
e-mail: ras@imach.uran.ru,*

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Россия*

Для прогнозирования разрушения материалов с упрочненным поверхностным слоем необходимо определение прочности этого слоя. Однако упрочненные поверхностные слои с субмикро- или нанокристаллической структурой, как правило, имеют небольшую толщину (несколько десятков микрометров), поэтому изготовление из них микрообразцов для проведения механических испытаний, таких как для объемно-упрочненных наноструктурированных материалов, является весьма трудоемким и не исключает внесения в изготавливаемый образец структурных изменений, которые могут повлиять на результаты механических испытаний. С одной стороны, для решения этих проблем могут быть эффективно использованы методы компьютерного моделирования и связанные с ними способы проведения виртуальных механических испытаний. С другой стороны, если рассматривать образец с упрочненным поверхностным слоем как композиционный материал, состоящий из матрицы и упрочняющего слоя, то, используя правило смесей, можно определить временное сопротивление разрыву упрочненного поверхностного слоя по результатам стандартных механических испытаний на одноосное растяжение [1].

Цель настоящей работы – оценка временного сопротивления разрыву упрочненного слоя на поверхности материала с использованием метода конечных элементов и по правилу смесей.

Проведена расчетно-экспериментальная оценка временного сопротивления разрыву упрочненного слоя на поверхности материала и установлено, что использование обоих способов оценки дает близкие значения временного сопротивления разрыву упрочненного поверхностного слоя. В частности, для поверхностно упрочненной среднеуглеродистой (0,51 мас. % С) конструкционной стали [2], временное сопротивление разрыву упрочненного поверхностного слоя составило 2700 МПа при оценке с использованием метода конечных элементов и 2671 МПа при оценке по правилу смесей. Полученные результаты свидетельствуют о возможности определения временного сопротивления упрочненного слоя на поверхности материала путем проведения стандартных механических испытаний на одноосное растяжение, что подтверждается данными расчета методом конечных элементов. Определено распределение нормальных напряжений в образце без упрочненного поверхностного слоя и с упрочненным поверхностным слоем. Показано, что наличие неградиентного упрочненного слоя толщиной 30 мкм на поверхности материала приводит к сильной локальной концентрации напряжений, которая обусловлена действием первичных мезоконцентраторов, возникающих в месте приложения к образцу внешней нагрузки, а также различием механических свойств материала основы и упрочненного поверхностного слоя. Известно, что концентрация напряжений может способствовать локализации деформации при пластическом течении. Однако поверхностно упрочненная сталь 50 демонстрирует равномерное пластическое течение при статическом и циклическом растяжении [2]. Это может быть обусловлено градиентным характером упрочненного слоя на поверхности стали 50 [2] что при расчете не учитывали.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ФАНО России по теме № 01201463331.

Литература

1. Образец для механических испытаний : пат. 170693 Рос. Федерация / Саврай Р. А., Макаров А. В., БИМП. – 2017. – Бюл. № 13.
2. Структура, механические характеристики, особенности деформирования и разрушения при статическом и циклическом нагружении закаленной конструкционной стали, подвергнутой комбинированной деформационно-термической наноструктурирующей обработке / А. В. Макаров, Р. А. Саврай, Э. С. Горкунов, А. С. Юровских, И. Ю. Малыгина, Н. А. Давыдова // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17. – № 1. – С. 5–20.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СВИНЦОВЫХ СПЛАВОВ

Егоров А.В., Поляков В.В., Салита Д.С.

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,
61, пр. Ленина, г. Барнаул, 656049, Россия,
e-mail: pvv@asu.ru

Свинцовые сплавы различного химического состава могут рассматриваться в качестве важных модельных объектов для исследования физических механизмов пластической деформации и разрушения в материалах с многоуровневой иерархической структурой. Это обусловлено тем, что весьма низкая температура плавления этих материалов обеспечивает протекание в них при комнатных температурах деформационных процессов, характерных для других металлических материалов в значительно более высоком температурном диапазоне [1]. Для исследования и диагностики этих процессов может быть использован метод акустической эмиссии. Информативные параметры акустико-эмиссионных сигналов, регистрируемые при нагружении свинцовых сплавов, отражают изменения в текущем состоянии материала из-за происходящих локальных перестроек структуры и могут быть применены для материаловедческого анализа и прогнозирования таких изменений [2].

В настоящей работе были исследованы образцы сплавов на основе свинца с различным химическим составом, в частности, с изменением концентрации олова в диапазоне от 1 до 10 %, а также с добавкой легирующих элементов, существенно повышавших прочностные характеристики сплава (Sb, Cd, Ga, Cu, Fe с суммарной концентрацией до 10 %). В испытываемых образцах специально задавалась различная микроструктура, что обеспечивалось за счет варьирования температуры и времени рекристаллизации из расплава, а также условиями последующей механической обработки образцов. Химический состав контролировался помощью рентгено-флуоресцентной спектromетрии, параметры микроструктуры определялись с привлечением электронной и оптической микроскопии. Образцы подвергались статическому растяжению вплоть до разрушения по «жесткой» схеме с одновременной регистрацией механических характеристик и параметров акустической эмиссии (среднеквадратичного напряжения U) [3, 4]. Экспериментальные данные представлялись для анализа в виде кривых деформационного упрочнения, строившихся в истинных координатах, и зависимостей U от степени деформации ϵ [3].

Результаты измерений выявили сильное влияние химического состава и структуры свинцового сплава на вид сигналов акустической эмиссии. Так, увеличение концентрации олова приводило к уменьшению максимумов на зависимостях $U(\epsilon)$, что, по видимому, отражало торможение движения дислокационных потоков на дисперсно-упрочненных границах раздела. В случае крупнозернистых сплавов наблюдались более мощные максимумы, медленно спадавшие с ростом степени деформации, для мелкозернистого сплава максимумы выражались слабее и при росте деформации быстро исчезали. Такое поведение может быть обусловлено изменением вклада зернограничного проскальзывания в деформацию свинцового сплава [1], именно в случае крупных зерен движение зернограничных дислокаций облегчено из-за пониженной плотности тройных стыков и акустико-эмиссионное излучение более мощное.

Полученные результаты могут быть использованы при акустико-эмиссионной диагностике поведения металлических сплавов при механическом нагружении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00914.

Литература

1. Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Елсукова Т. Ф. Физическая мезомеханика зернограничного скольжения в деформируемом поликристалле // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – С. 15–22.
2. Лепендин А. А., Поляков В. В. Скейлинг характеристик акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, вып. 7. – С. 96–100.
3. Салита Д. С., Поляков В. В. Влияние структуры свинцового сплава на акустическую эмиссию при пластической деформации и разрушении // Известия АГУ. – 2017. – № 1. – С. 53–57.

МНОГОЧАСТОТНАЯ ВИХРЕТОКОВАЯ ДИАГНОСТИКА НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИГНАЛОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ

Борцова Я.И., Егоров А.В., Лепендин А.А., Поляков В.В., Салита Д.С.

*ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,
61, пр. Ленина, г. Барнаул, 656049, Россия,
e-mail: pvv@asu.ru*

Многочастотные вихретоковые измерения являются одним из широко распространенных методов неразрушающей диагностики металлических материалов и изготовленных из них изделий и конструкций. Получаемый при этих измерениях экспериментальный годограф системы «датчик – контролируемый объект» отражает совместное действие различных факторов, влияющих на результаты диагностики. Для надежного построения годографа обычно используется последовательный перебор частот в широком диапазоне [1]. В настоящей работе описан экспериментальный метод, при котором для получения годографа используется одно измерение. Это осуществляется за счет возбуждения вихретокового датчика сигналом специальной формы, получаемым путем суперпозиции гармонических сигналов с заданными частотами [2]. Регистрируемый выходной сигнал имеет линейчатый спектр, содержащий диагностическую информацию о параметрах датчика на различных частотах.

Описанный подход был апробирован для образцов алюминия, меди, алюминиевых и немагнитных бронзовых сплавов. При измерениях использовался накладной параметрический датчик, представлявший катушку индуктивности, помещенную в полуброневого ферритовый сердечник. Образцы для испытаний имели вид плоских пластин различной толщины, каждая выбиралась таким образом, чтобы явно проявлялось влияние глубины скин-слоя. Измерения проводились при различной величине зазора между поверхностью образца и датчиком, задававшейся с помощью диэлектрических прокладок. Для повышения надежности контроля результаты измерений подвергались обработке с привлечением метода главных компонент [3]. Эта математическая обработка дала возможность разделить действие на годограф таких влияющих факторов, как толщина образца, величина зазора и удельная электропроводность.

Полученные результаты показали, что развитый подход, основанный на использовании при многочастотных вихретоковых измерениях сигналов специальной формы, позволил за счет проведения одного измерения получить экспериментальный годограф, достигаемая точность которого обеспечила надежную диагностику различных влияющих факторов. Это свидетельствует о перспективности применения описанного метода в автоматизированных системах неразрушающей диагностики и контроля металлических материалов, изделий и конструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00914.

Литература

1. Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method / A. V. Egorov, V. V. Polyakov, D. S. Salita, E. A. Kolubaev, S. G. Psakhie, A. G. Chernyavskii, I. V. Vorobei // Defence Technology. – 2015. – Vol. 2. – P. 99–103. – DOI: 10.1016/j.dt.2014.12.002.
2. Применение сигналов специальной формы в многочастотных вихретоковых измерениях. Автометрия / А. В. Егоров, В. В. Поляков, А. А. Лепендин, Я. И. Грачева. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 28–35. – DOI: 10.15372/AUT20170304.
3. Egorov A. V., Kucheryavskiy S. V., Polyakov V. V. Resolution of effects in multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 2017. – Vol. 160. – P. 8–12. – DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.11.00.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПОЛЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сафиуллин А.Р., Сафиуллин Р.В.

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (ИПСПМ РАН),
39, Степана Халтурина, Уфа, 450001, Россия,
e-mail: dr_rvs@mail.ru, d12art@mail.ru*

Сверхпластическая формовка (СПФ) является одним из наиболее эффективных технологических процессов обработки листовых материалов, Методом СПФ могут быть получены самые разнообразные конструкции, узлы и детали, которые разделяют по количеству используемых листов [1–3]. Разработка рациональной технологии СПФ изделий из титановых сплавов может потребовать значительных затрат времени и ресурсов. Существенное сокращение сроков разработки и отладки технологии может быть достигнуто за счет использования методов компьютерного моделирования, позволяющих подтвердить или опровергнуть возможность получения конечной конфигурации изделий, показать распределение толщины по профилю отформованных деталей и дает возможность определить образование различных дефектов типа утяжин и складок. По результатам моделирования можно определить технологические ограничения на геометрические параметры изделия и соответственно оптимизировать геометрию. Также можно оптимизировать параметры СПФ – давление формирующего газа от времени с целью обеспечения скорости деформации в оптимальном интервале сверхпластичности.

Цель работы – разработка рациональных режимов процесса СПФ полых трехслойных гофрированных конструкций с помощью компьютерного моделирования.

В работе описаны результаты компьютерного моделирования процесса сверхпластической формовки многослойных полых гофрированных конструкций из титанового ВТ6. Проведено сравнение формовки двух типов трехслойных конструкций, отличающихся напряженно-деформированным состоянием. На основании полученных результатов численного моделирования разработан рациональный режим СПФ, обеспечивающий деформирование ребер жесткости в условиях сверхпластичности (СП) и сокращение времени формовки трехслойной конструкции.

С помощью компьютерного моделирования проведено сравнение формовки двух типов трехслойных конструкций, отличающихся напряженно-деформированным состоянием. Определение оптимальной зависимости давления газа от времени при СПФ является важнейшей задачей. Правильное решение этой задачи позволит получать готовые конструкции с минимальной разнотолщинностью и за минимальное время. При определении зависимости величины давления рабочего газа от времени необходимо учитывать двухстадийность процесса СПФ трехслойных конструкций. На основе результатов математического моделирования СПФ предложен вид зависимости давления газа от времени, обеспечивающий деформирование ребер жесткости в условиях СП, близких к оптимальным, при сокращении времени формовки, в этом случае разнотолщинность ребер жесткости лежит в пределах 5 %.

Литература

1. Сафиуллин Р.В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Часть 1. Международный опыт // Письма о материалах. Т. 2(1). 2012. С. 32–35.
2. Сафиуллин Р.В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Часть 2. Опыт ИПСП РАН // Письма о материалах. Т.2(1). 2012. С. 36–39.
3. Сафиуллин А.Р., Круглов А.А., Сафиуллин Р.В. Полое изделие с гофрированным наполнителем // Патент на полезную модель. № 101949. 2011.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛЫХ ЯЧЕИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Сафиуллин Р.В., Сафиуллин А.Р.

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (ИПСПМ РАН),
39, Степана Халтурина, Уфа, 450001, Россия,
e-mail: dr_rvs@mail.ru, d12art@mail.ru*

Одним из наиболее эффективных технологических процессов обработки листовых материалов, реализующих преимущества сверхпластичности (СП), является сверхпластическая формовка (СПФ) в сочетании с диффузионной сваркой (ДС) [1–3]. Методом СПФ/ДС могут быть получены самые разнообразные полые конструкции, узлы и детали. Большинство ведущих мировых компаний, производящих авиакосмическую технику, успешно применяют и развивают данную технологию для получения ответственных конструкций летательных аппаратов. Разработка надежной промышленной технологии СПФ/ДС, позволяющей получать качественные узлы и детали современных летательных аппаратов (ЛА), невозможна без использования современных методов неразрушающего контроля.

Цель работы – разработка методики и установки для неразрушающего контроля полых ячеистых конструкций с помощью цифрового голографического интерферометра (ЦГИ).

По данному методу с помощью лазерного излучения на цифровую видеокамеру регистрируются два (или более) голографических изображения исследуемого объекта, соответствующих различным фазам процесса деформирования поверхности под действием внешней нагрузки. Путем цифровой обработки поле разности фаз может быть преобразовано в поле перемещений поверхности объекта, которые произошли в промежутке между первой и второй экспозициями. Основными преимуществами метода является бесконтактность, высокая чувствительность к перемещениям (доли микрона), возможность проведения измерений одновременно по всей поверхности изделия, возможность проведения измерений независимо от формы и материала изделия [4]. Методом конечных элементов рассчитаны поля перемещений поверхности конструкций при различных способах закрепления и нагружения в упругой области. Показано, что нагружение закрепленной по контуру конструкции внутренним давлением позволяет выявлять ряд типичных дефектов, таких как непровар или разрыв ребра жесткости. Отработка методики неразрушающего контроля проводилась на плоских образцах полых лопатки и лопатках имитаторах, полученных по технологии СПФ/ДС. В работе приведено полное описание методики и установки для неразрушающего контроля и результаты контроля. [5].

Литература

1. Сафиуллин Р. В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Ч. 1. Международный опыт // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2 (1). – С. 32–35.
2. Сафиуллин Р. В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Ч. 2. Опыт ИПСП РАН // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2 (1). – С. 36–39.
3. Полое изделие с гофрированным наполнителем : пат. на полезную модель 101949 Рос. Федерация / Сафиуллин А. Р., Круглов А. А., Сафиуллин Р. В. – № 2011.
4. Расчет полей перемещений трехслойных полых конструкций для неразрушающего контроля качества методом цифровой голографической интерферометрии / А. Х. Ахунова, С. В. Дмитриев, Р. В. Сафиуллин, А. Р. Сафиуллин, Ф. Ф. Сафин // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2, № 2. – С. 90–94.
5. Сверхпластическая формовка листовых заготовок в протяженную клиновую матрицу / А. Х. Ахунова, С. В. Дмитриев, А. А. Круглов, Р. В. Сафиуллин // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 9. – С. 38–41.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРГАНА ИЗ КОСТНОЙ ТКАНИ ПО ДАННЫМ ТОМОГРАФИИ

Герасимов О.В., Воробьев О.В., Семенова Е.В.,
Харин Н.В., Саченков О.А.

*Казанский Федеральный Университет,
18, Кремлевская, Казань, 420000, Российская Федерация,
e-mail: 4works@bk.ru*

В настоящее время нашло распространение применение компьютерной рентгеновской томографии – метод неразрушающего послойного исследования внутреннего строения предмета для дефектоскопии и оценки структуры материала не только конструкций, но и биологических объектов, что в клинике может играть решающую роль.

Для оценки механических свойств органов из костной ткани использовались данные компьютерной томографии. С этой целью определялись пороги экстерьера и интерьера. Полученный орган разбивался на регулярную четырехугольную сетку. Далее, по каждому элементу сетки строился репрезентативный элемент. Для получения репрезентативного элемента, соответственно, строилась регулярная гексагональная сетка из 8 узловых конечных элементов с линейной аппроксимацией. Размер каждого элемента определяется размером вокселя для сканированного образца. Сетка строилась по маске данных: то есть если в заданной точке, по данным томографии, нет материала, то там нет и конечного элемента. В результате получаем связанную конечно-элементную сетку репрезентативного элемента, которая подвергалась численным экспериментам: по три нагружения на сдвиг и растяжения. По полученным данным определялись направления ортотропии и величины механических характеристики образца. Таким образом получаем распределение интегральных механических свойств всего образца с заданным уровнем дискретизации.

Полученные свойства прикладывались к конечно элементной сетке органа из костной ткани, после чего может быть сформулирована краевая задача, позволяющая оценить напряженно-деформированное состояние органа.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ЦИРКОНИЯ И АЛЮМИНИЯ

Севостьянова И.Н., Саблина Т.Ю., Савченко Н.Л., Григорьев М.В.,
Утяганова В.Р., Буякова С.П., Кульков С.Н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
Академический проспект 2/4, г. Томск, 634055, Россия, e-mail: sevir@ispms.tsc.ru*

Ключевыми параметрами при использовании пористых хрупких керамических материалов в качестве огнеупоров, фильтров, остеозамещающих элементов в медицине, являются механические характеристики. Наличие в таких материалах пористости сильно различающейся по объему, форме пор, среднему размеру и распределению пор по размерам обуславливает особое механическое поведение, связанное с переходами от линейно-упругой области в обширную область неупругой деформации, вызванную процессами зарождения и распространения микродефектов и разрушением пространственной поровой структуры.

Цель данной работы – изучение структуры, прочностных свойств и особенностей поведения при деформации и разрушении пористых керамических материалов Al_2O_3 и ZrO_2 -3 мол. % Y_2O_3 с бимодальной и унимодальной поровой структурой в широком диапазоне объема порового пространства.

Образцы с унимодальной пористостью получены методом шликерного литья порошков Al_2O_3 и ZrO_2 -3 мол. % Y_2O_3 (ZrO_2 (Y)) с последующим удалением связки спеканием на воздухе в интервале температур 1100–1600 °С с шагом 100 °С с изотермической выдержкой в течение одного часа. Для получения образцов с бимодальной пористостью в шликер дополнительно вводили сферические частицы сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) со средним размером частиц 100 мкм, в количестве 25 об. %.

Поровая структура керамических образцов обоих составов включала в себя поры двух типов: мелкие поры размером 0,05–20 мкм и крупные поры размером 50–300 мкм. При этом пористость образцов с унимодальным распределением пор по размерам в Al_2O_3 изменялась от 33 до 10 %, а в ZrO_2 (Y) от 50 до 3,5 % в зависимости от температуры спекания. Пористость образцов с бимодальным распределением пор для обоих составов варьировалась от 70 до 35 %.

Проведенные механические испытания на осевое сжатие показали, что образцы Al_2O_3 с унимодальным распределением пор во всем интервале изученной пористости проявляли упругое поведение вплоть до разрушения. На деформационных кривых образцов Al_2O_3 с бимодальным распределением пор по размерам при нагружении сжатием имело место отклонение от линейности и осцилляции напряжений, связанное с появлением внутренних трещин, и лишь затем достигался предел прочности. Для образцов ZrO_2 (Y), независимо от типа распределения пор по размерам, переход от «квазипластичного» к хрупкому поведению происходил для образцов, полученных при температурах спекания 1400–1600 °С, с пористостью от 3,5 до 8 % для керамики с унимодальным распределением пор по размерам и с пористостью \approx 38 % – для образцов с бимодальным распределением пор по размерам.

Установлено, что образцы керамических материалов обоих составов с бимодальной пористостью не уступали по прочностным свойствам унимодальной керамике с порами микронного размера при равной пористости. Основным фактором, определяющим поведение материалов при деформации и последующего разрушения, является общий объем остаточной пористости.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013–2020 гг., направление III.23.

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ РЕГУЛЯРНОМ И НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Савкин А.Н., Сундер Р., Седов А.А., Бадиков К.А.

*Волгоградский государственный технический университет,
д. 28, пр. Ленина, Волгоград, 400005, Россия, e-mail: ffpic@vstu.ru*

В настоящей работе на примере алюминиевого сплава 2024-T3 проведен анализ кинетики роста усталостных трещин при регулярном и нерегулярном нагружении с учетом воздействия на процесс роста трещины разной величины асимметрии, амплитуды и характера переменного нагружения. Предложена модель прогнозирования долговечности роста трещины на среднем участке кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР).

Исследовали компактные образцы размером 60×62,5×5 мм с краевой трещиной. Испытания проводили на BISS Nano 25 kN при комнатной температуре и постоянной частоте нагружения 5 Гц.

Исследования при регулярном нагружении заключались в проведении испытаний при разной R от 0 до 0,75 и P_{\max} до 3,5 кН. Для испытания при нерегулярном нагружении формировались спектры квазислучайного характера (рис. 1) на основании стандартных спектров нагружения: MiniFALSTAFF (MFS); MiniTWIST (MTW); SAETRANS.

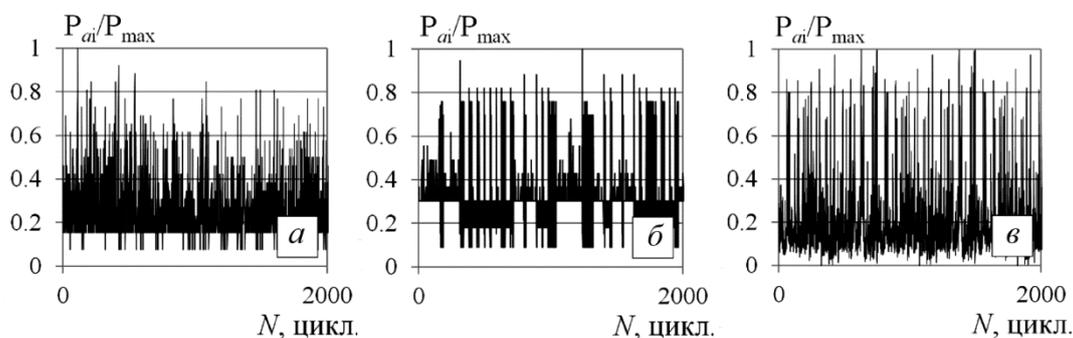


Рис. 1. Выборка из нормированных спектров для нагружения алюминиевого сплава:
 a – MFS; b – MTW; v – SAETRANS

В нашем исследовании использован принцип по замене нерегулярного циклического нагружения эквивалентным регулярным по повреждаемости соответствующем нерегулярному, путем введения коэффициента полноты блока нерегулярного нагружения V (1):

$$V = \left[\frac{1}{v_b} \left[\sum_{i=1}^{v_b} v_{ai} \left(\frac{\Delta P_{ai}}{P_{\max}} \right)^n \right] \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

где v_b, v_a – продолжительность используемой выборки и блока переменного нагружения с нагрузкой ΔP_{ai} ; $\Delta P_{ai} / P_{\max}$ – нормированная i -я амплитуда нагружения, коэффициент n был принят равным значению наклона среднего участка КДУР.

Для учета явления «закрытия» трещины, имеющем место при асимметриях цикла R менее 0,6–0,7, вводится параметр U :

$$U = 0,55 + 0,33 \cdot R + 0,12 \cdot R^2. \quad (2)$$

В этом случае размах эффективного КИН в устье трещины равен:

$$\Delta K_{\text{эфф}} = \Delta K \cdot U. \quad (3)$$

С учетом вышеперечисленных формул прогнозирование роста трещины при регулярном и нерегулярном нагружениях по принципу «цикл-за-циклом» $N_{Ц}$ можно проводить:

$$N_{Ц} = \int_{a_0}^{a_{кр}} \frac{1}{C \Delta K_{эфф}^n} da, \quad (4)$$

где a_0 ; $a_{кр}$ – начальная и критическая длина трещины.

Другой подход основан на предложении рассматривать кинетику роста трещины при переменном нагружении на основании ее роста при регулярном $N_{Э.CAL}$ и учета характера переменного нагружения через V при одинаковых силовых параметрах P_{max} и R (5):

$$N_{P.VAR} = N_{Э.CAL} \cdot Q$$

$$Q = 10^{(1+A \lg n) \cdot (1-V)}, \quad (5)$$

где A – нормирующий параметр, равный 1,8 для исследуемого сплава, Q – коэффициент увеличения продолжительности роста усталостной трещины при нерегулярном нагружении по сравнению с регулярным; $N_{Э.VAR}$ – экспериментальная продолжительность роста трещин при нерегулярном нагружении; $N_{P.VAR}$ – расчетная по формуле (7).

На рис. 2 а представлены сравнительные результаты расчета и эксперимента по оценке продолжительности роста усталостной трещины при регулярном нагружении с различной R и P_{max} . Коэффициент корреляции составил $r = 0,96$.

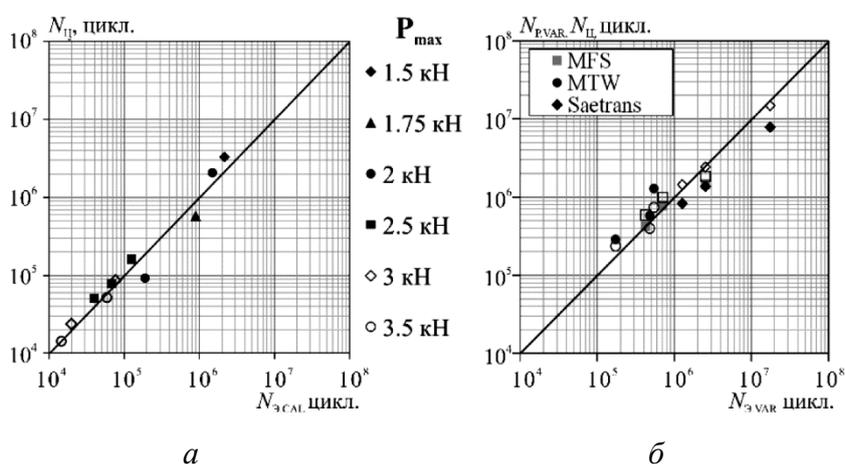


Рис. 2. Взаимосвязь расчетных и экспериментальных значений продолжительности роста усталостных трещин для регулярного (а) и нерегулярного (б) нагружений

Сравнительный анализ при нерегулярном нагружении с различными спектрами P_{max} и R показан на рис. 2 б. Расчет проводился двумя методами: первый – на основании формулы (5) (неокрашенные точки), второй – расчет «цикл-за-циклом» (4) с использованием эффективного КИН (3), учитывающего (2) и (1) (закрашенные точки). Оба подхода показали сравнимые результаты. Коэффициенты корреляции составили – $r_1 = 0,96$; $r_2 = 0,93$ соответственно.

Таким образом, можно сделать выводы.

1. Показан подход по оценке продолжительности роста усталостной трещины при регулярном и нерегулярном нагружении, с различными параметрами силового воздействия, учитывающие «закрытие» трещины и характер случайного нагружения.

2. Предлагаемый метод расчета долговечности на основе учета критериев оценки характера нагружения дает схожий результат с часто используемым в инженерной практике поцикловым методом расчета, но в отличие от него предполагает намного меньшее число входных параметров. Для расчета поцикловым методом необходимо знать всю историю нагружения и производить расчеты длины трещины на каждом цикле, что требует применения большего количества машинных ресурсов, нежели предлагаемый метод.

ОЦЕНКА КОРРОЗИИ МЕТАЛЛА ПРИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИИ ГАЗОВ

Семенов М.Е.¹, Иванова И.К.^{1,2}, Корякина В.В.¹

¹Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, д.1,

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
677000 г. Якутск, ул. Белинского, д. 58

Изучение газовых гидратов вызывает все больший научный и практический интерес в различных областях науки. Способность концентрировать газ-гидратообразователь в твердую структуру и свойство самоконсервации газогидратов при отрицательных температурах положены в основу научно-технических направлений, связанных с созданием технологий хранения и транспортировки природного газа. Следовательно, разработки новых технологий получения газогидратов с минимальными энергозатратами являются актуальными задачами [1, 2].

С другой стороны, при добыче и транспортировке нефти и газа существует проблема образования гидратных пробок в трубопроводах, поэтому оценка влияния процесса гидратообразования на качество конструкционных материалов весьма важна.

Для синтеза газогидратов используются специальные стальные реакторы, которые функционируют при условиях высокой влажности и температурах близких к 0 °С, а также при повышенных давлениях газа-гидратообразователя. Кроме того, для синтеза газогидратов применяются различные приемы интенсификации процесса превращения системы «газ–жидкость–гидрат» путем внедрения в систему дополнительной металлической поверхности для увеличения площади контакта фаз [3].

Известно [4], что в процессе гидратообразования происходит активная коррозия металлической стенки реакторов, даже высоколегированной стали. Впервые данный процесс был описан Макогоном в работах [4, 5]. Интересно отметить, что на корродирующей металлической поверхности наблюдается более интенсивное гидратообразование [6].

Таким образом, цель работы – изучение поверхности металлических пластин до и после гидратообразования природного газа для оценки влияния процесса гидратообразования на интенсивность коррозии металла.

Синтез гидратов природного газа из дистиллированной воды в присутствии стальных пластин (марки 1211) осуществлялся в стальных камерах-реакторах в следующем режиме: давление в реакторе 5 МПа при линейном снижении температуры от 298 до 268 К в течение 5 суток по методике, описанной в работе [6]. При этом стальная пластина помещалась в дистиллированную воду на половину от своей высоты. Высота пластин 5 см, а площадь поверхности составляет 70,56 см².

На рис. 1 видно, что рост газовых гидратов наблюдается по всей поверхности пластин. Причем на поверхности гидрата сорбируются продукты коррозии металла.



Рис. 1. Гидрат природного газа, полученный в присутствии стальных пластин

Для того чтобы оценить и сравнить влияние процесса гидратообразования на стальные пластины было изучено изменение внешнего вида, массы и шероховатости до и после гидратообразования (рис. 2). Шероховатость пластин измеряли портативным профилометром Mitutoyo Surftest Sj-201 по методике, описанной в работе [7]. На основании изменения массы стальных пластин рассчитана скорость коррозии по формуле [8]:

$$v = \frac{\Delta m}{(S \cdot t)}$$

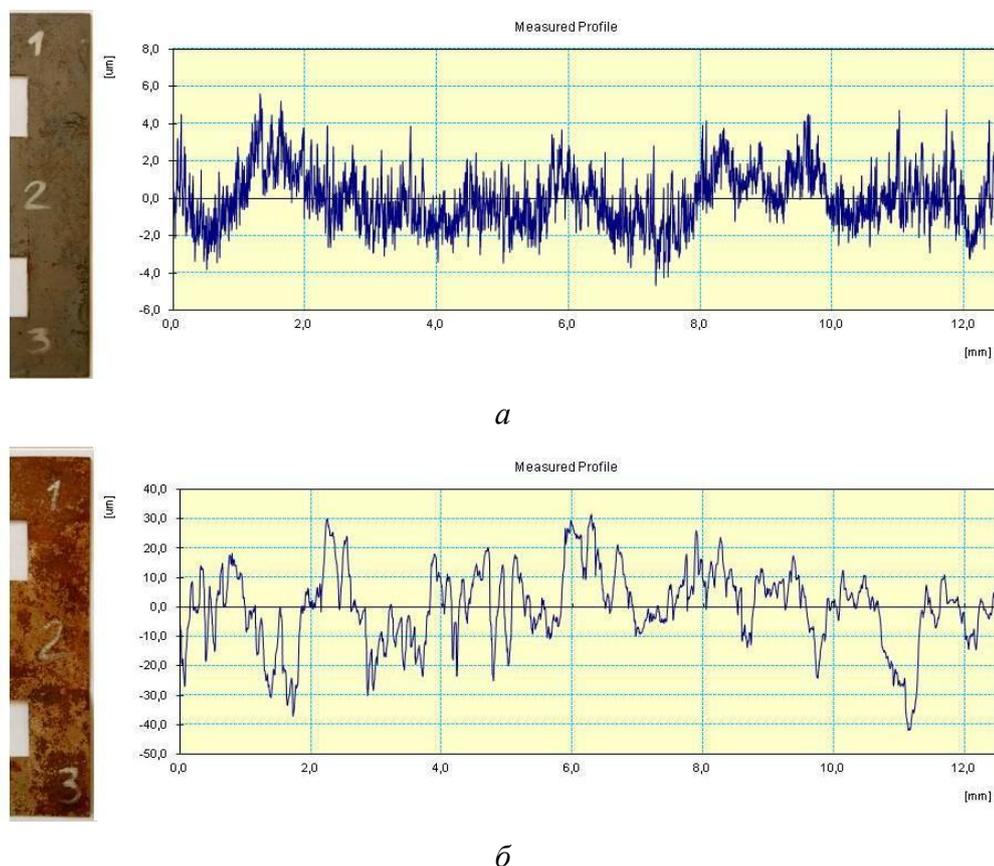


Рис. 2. Профиль шероховатости металлической пластины до (а) и после (б) гидратообразования

На рис. 2 представлено изменение внешнего вида и профиля шероховатости стальных пластин до и после гидратообразования природного газа. Шероховатость пластин после гидратообразования увеличивается в 9 раз, по сравнению с пластинами до гидратообразования. А шероховатость стальных пластин, находившихся в дистиллированной воде при тех же условиях, но при атмосферном давлении воздуха внутри реактора, увеличивается всего на 6 раз.

Таким образом, показано, что в экспериментах с гидратообразованием наблюдается равномерная коррозия по всей поверхности стальных пластин, тогда как в дистиллированной воде границы коррозии можно визуально разделить на области ее распространения. Установлено, что в процессе гидратообразования природного газа скорость коррозии стальных пластин в 1,5 раза превосходит данный показатель стальных пластин, находившихся в дистиллированной воде в атмосфере воздуха. Вероятнее всего значительное изменение массы стальных пластин связано с тем, что при гидратообразовании происходит сорбция продуктов коррозии металла на поверхности гидрата.

Литература

1. Takashi N. Study of natural gas hydrate (NGH) carriers // Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver, Canada, July 6–10, 2008.
2. Horiguchi K. Completion of natural gas hydrate (NGH) overland transportation demo project // Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011), Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17–21, 2011.
3. Устройство для получения газогидратов : пат. 2166348 Рос. Федерация / Мельников В. П., Нестеров А. Н., Феклистов В. В. – № 99119386/12 ; заявл. 01.09.1999 ; опубл. 10.05.2001, Бюл. № 13.
4. Макогон Ю. Ф. Гидраты природных газов. – М. : Недра, 1974. – 204 с.
5. Макогон Ю. Ф. Газогидраты: результаты и проблемы // Газовая промышленность. – 2012. – № 676. – С. 82.
6. Семенов М. Е., Шиц Е. Ю. Изучение процесса получения гидратов метана в статических условиях // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 5. – С. 457–465. –URL: http://www.ogbus.ru/authors/SemenovME/SemenovME_2.pdf
7. Стручков Н. Ф. Корреляция шероховатостей контактных поверхностей трения покрытия с тугоплавкими добавками и стального контртела // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 9 (129). – С. 29–32.
8. Неверов А. С. Коррозия и защита металлов : учеб. пособие. – Минск : Высшая школа, 2007. – 222 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ВСТАВОК ДЛЯ СВАРКИ СО₂-ЛАЗЕРОМ СТАЛИ 321 И ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Сенаева Е.И.^{1,2}, Макаров А.В.^{1,2,3}, Пугачева Н.Б.¹, Трушина Е.Б.¹, Вичужанин Д.И.¹

¹ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия,

²УрФУ, Россия, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Россия,

³ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН, д.18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург., 620108, Россия,
e-mail: nat@imach.uran.ru

Известно, что коррозионностойкие аустенитные стали и титановые сплавы обладают плохой свариваемостью. Дополнительные трудности возникают при необходимости соединить конструктивные элементы, изготовленные из этих разнородных материалов, из-за существенных различий их теплофизических свойств. В этом случае с целью получения прочного соединения целесообразно использовать промежуточные пластины для создания плавного перехода от одного материала к другому при их расплавлении, а также снижения вероятности появления трещин в зонах термического влияния. Традиционно используют в качестве промежуточных прослоек сплавы на основе Cu, Ag и Ni. Особенно эффективно применение переходных вставок при использовании высококонцентрированных источников энергии – лазера и электронного луча.

Цель нашего исследования – определение микроструктуры, фазового и химического составов сварных швов, полученных при лазерной сварке листов толщиной 3 мм из аустенитной стали 321 и титанового сплава через промежуточные пластины Cu, Ag-Cu-Zn и Ni.

Сварку листов толщиной 3 мм проводили СО₂-лазером постоянного действия с максимальной мощностью 3 кВт. Образцы двигались относительно лазерного луча со скоростью около 1 м/мин, мощность излучения составляла 2,3 кВт. Для защиты поверхности сварочной ванны и перегретых околошовных зон использовали смесь углекислого газа с воздухом. На всех образцах проведен анализ макро- и микроструктуры, определен характер распределения значений микротвердости по высоте и ширине швов. Локальный химический состав определяли на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGAII XMU с энергодисперсионной приставкой фирмы OXFORD, фазовый рентгеноструктурный анализ выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD7000. Прочность соединений определяли по результатам испытаний на статическое растяжение на машине INSTRON 8801.

При лазерной сварке коррозионностойкой аустенитной стали 321 и титанового сплава через промежуточные пластины меди, сплава Ag-Cu-Zn и никеля на границе между материалом шва и соединяемыми листами формируются диффузионные переходные зоны, придающие прочность соединениям. Высокие скорости охлаждения при лазерной сварке позволяют получать в сварном шве и диффузионных переходных зонах твердые растворы, упрочненные дисперсными частицами интерметаллидов, размеры которых не превышают 30 нм. Максимальная прочность соединения получена при использовании промежуточной медной пластины – $\sigma_b = 385$ МПа. Сварной шов в этом случае состоит из твердого раствора на основе Cu и частиц Ti(Fe,Cr)₂, TiCu₄. Шов, полученный с промежуточной вставкой пластины Ag-Cu-Zn имеет минимальную толщину, наиболее дисперсную и однородную структуру, но его прочность невелика – $\sigma_b = 289$ МПа, что связано с невысокой прочностью твердого раствора на основе Ag. При использовании пластины никеля зафиксирована междендритная усадочная пористость и микротрещины на границе с титаном, поэтому прочность соединения составила всего $\sigma_b = 156$ МПа.

Работа выполнена на оборудовании центра коллективного пользования «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН в рамках выполнения государственного задания ФАНО России по темам АААА-А18-118020790145-0 и № АААА-А18-118020190116-6.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ И МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМООБРАБОТКИ

Костин В.Н.^{1,2}, Сербин Е.Д.^{1,2}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
18, Софьи Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Россия,

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
19, Мира, Екатеринбург, 620002, Россия,
e-mail: kostin@imp.uran.ru

Магнитный и акустический виды контроля являются наиболее применяемыми в области определения напряженно-деформированного состояния и уровня остаточных напряжений стальных изделий. В то же время противоречивость имеющихся экспериментальных данных о чувствительности магнитных и акустических параметров контроля к упругим и пластическим деформациям является одной из ключевых проблем контроля и диагностики напряженно-деформированного состояния и уровня остаточных напряжений [1]. В последнее время возрастает актуальность разработки методик и устройств, позволяющих локально измерять комплекс магнитных характеристик, т.е. осуществлять многопараметровую диагностику [2, 3]. Многопараметровая диагностика, основанная на измерении как магнитных параметров, так и характеристик, связанных с динамикой перестройки доменной структуры при перемагничивании, может обеспечить более надежное определение напряженно-деформированного и структурно-фазового состояния. Примером таких характеристик могут служить амплитудные и частотные параметры магнитоакустической эмиссии (МАЭ) [1, 4].

Цель работы – проведение сравнительного анализа магнитных, магнитоакустических и акустических параметров контроля и сопоставление их чувствительности к изменению напряженно-деформированного состояния углеродистых сталей после холодной деформации и различных термообработок. Основная задача настоящей работы – выявление измеряемых структурно-чувствительных магнитных, магнитоакустических и акустических параметров, пригодных для диагностики напряженно-деформированного состояния стальных объектов.

Исследован комплекс магнитных и магнитоакустических свойств холоднодеформированных и термообработанных сталей 20Г и 70Г. Установлено, что при увеличении температуры отжига сталей вплоть до 700 °С монотонно растут значения параметров, связанных с интенсивностью необратимых процессов перемагничивания. Показано, что коэрцитивная сила стали 70Г при вариации отжига меняется немонотонно и не может быть параметром контроля. Показано, что при возможности контактного квазистатического измерения оптимальными магнитными параметрами контроля напряженно-деформированного состояния обеих сталей могут быть остаточная магнитная индукция вещества или индукция коэрцитивного возврата. Оценена структурная чувствительность группы параметров магнитоакустической эмиссии (МАЭ), таких как амплитуда, основная частота, поле максимума МАЭ [1]. Исследование влияния условий возбуждения и регистрации МАЭ описано в работе [5].

Показано, что остаточная магнитная индукция и индукция коэрцитивного возврата являются достаточно универсальными параметрами контроля таких термических обработок, как отпуск закаленных и отжиг холоднодеформированных сталей. Эти параметры контроля могут использоваться как отдельно (однопараметровый контроль), так и совместно (двухпараметровый контроль) [6].

Показано, что амплитуда магнитоакустической эмиссии (МАЭ) исследованных материалов коррелирует с величиной их остаточной магнитной индукции и может быть использована в сканирующих системах структуроскопии [1, 6].

Полученные результаты могут быть полезны при разработке магнитных и магнитоакустических методов контроля и диагностики.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Диагностика» (Г.р. № АААА-А18-118020690196-3).

Литература

1. Костин, В.Н. Магнитные и магнитоакустические параметры контроля напряженно-деформированного состояния углеродистых сталей, подвергнутых холодной пластической деформации и отжигу [Текст] / В.Н. Костин, О.Н. Василенко, Д.Ю. Филатенков, Ю.А. Чекакина, Е.Д. Сербин // Дефектоскопия. – 2015. – № 10. – С. 33–41.
2. Костин, К.В. Выбор параметров и алгоритма магнитной твердометрии углеродистых термообработанных сталей методом регрессивного моделирования [Текст] / К.В. Костин, Я.Г. Смородинский, Т.П. Царькова, В.М. Сомова, Е.Ю. Сажина // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 3–11.
3. Мужичкий, В.Ф. Многопараметровый метод оценки напряженно-деформированного состояния стальных изделий и трубопроводов [Текст] / В.Ф. Мужичкий, М.Х. Султанов, Р.В. Загидулин, П.С. Макаров // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 8. – С. 17–22.
4. Костин, В.Н. Амплитудно-частотные характеристики магнитоакустической эмиссии термообработанных сплавов железа [Текст] / В.Н. Костин, М.А. Гурьев, О.Н. Василенко, Д.Ю. Филатенков, Я.Г. Смородинский // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 103–110.
5. Костин, В.Н. Особенности возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных объектах [Текст] / В.Н. Костин, Д.Ю. Филатенков, Ю.А. Чекакина, О.Н. Василенко, Е.Д. Сербин // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – № 2. – С. 209–216.
6. Костин, В.Н. Магнитоакустический контроль твердости холоднодеформированных и термообработанных углеродистых сталей [Текст] / В.Н. Костин, В.И. Пудов, Е.Д. Сербин, О.Н. Василенко // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 2. – С. 41–46.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Сергеев М.В.^{1,2}, Балохонов Р.Р.², Романова В.А.², Емельянова Е.С.^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
пр. Ленина 36, 634050, Томск, Россия,

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический 2/4, 634055, Томск, Россия,
e-mail: sergeevmaximv@gmail.com

Сварка трением с перемешиванием является перспективным способом соединения металлов, демонстрирующим определенные преимущества в сравнении с традиционными методами сварки. Данный метод широко применяется для сварки алюминиевых сплавов, используемых в авиационной, кораблестроительной и аэрокосмической промышленности. В связи с тем, что такие материалы подвергаются термомеханическим воздействиям с различными скоростями нагружения, актуальной проблемой является изучение динамического деформационного поведения алюминиевых сплавов в зоне сварного шва.

В настоящей работе на основе модели Немата–Нассера и Гуо разработана термомеханическая модель деформирования алюминиевого сплава 6061-T6. Расчет одноосного нагружения сплава с различными скоростями и температурами деформирования проводился в трехмерной постановке с использованием конечно-элементного пакета ABAQUS/Explicit. Полученные результаты согласуются с данными, рассчитанными при решении обыкновенного дифференциального уравнения, и данными, полученными из натуральных экспериментов на растяжение.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-01-00469-а).

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Сергеев С.Н.¹, Галеев Р.М.¹, Сафаров И.М.¹, Корзникова Г.Ф.¹,
Гладковский С.В.², Двойников Д.А.²

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, г. Уфа, 450001,

²Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская 34, г. Екатеринбург, 620049,

e-mail: nikocem17@gmail.com

Сложные климатические условия на территории нашей страны определяют эксплуатацию конструкций и техники при повышенных механических нагрузках и пониженных температурах, приводящих к преждевременному выходу из строя деталей и узлов. В отдельных случаях разрушение деталей машин и элементов конструкций является причиной техногенных катастроф, аварий и чрезвычайных происшествий. Для предотвращения катастрофических разрушений необходима разработка новых технологий повышения ресурса и надежности технических систем, в частности за счет повышения комплекса механических свойств конструкционных материалов. К таким материалам относятся экономнолегированные низкоуглеродистые стали, широко применяемые в промышленности благодаря хорошей технологичности и невысокой себестоимости. Однако к существенному недостатку данных сталей относится резкое снижение сопротивления хрупкому разрушению при низких климатических температурах, что может привести к необратимым последствиям. Решить обозначенную проблему можно путем повышения комплекса механических свойств низкоуглеродистых сталей за счет формирования в них ультрамелкозернистой структуры волокнистого типа методами деформационно-термической обработки (ДТО).

В работе исследовано влияние ультрамелкозернистой структуры, полученной методом теплой прокатки и последующего отжига, на прочность, пластичность и ударную вязкость низкоуглеродистой стали в интервале температур от 20 °С до –196 °С.

Установлено, что деформационно-термическая обработка методом прокатки привела к формированию вытянутой зеренной структуры со средним поперечным размером зерен (субзерен) 0,5 мкм. Карбиды пластинчатой формы в перлитных колониях в процессе деформационно-термической обработки трансформируются в частицы сферической формы диаметром от 50 до 200 нм. После дополнительного отжига при температуре прокатки существенного изменения структуры не наблюдается, но происходит снижение уровня внутренних напряжений.

Механические испытания по схеме одноосного растяжения в интервале температур от 20 °С до –196 °С показали, что прочность и пластичность низкоуглеродистой стали после ДТО слабее зависят от понижения температуры по сравнению с исходным горячедеформированным состоянием, т. е. полученное состояние является более хладостойким. Так, в исходном состоянии стали при понижении температуры до –196 °С происходит повышение значения предела текучести на 400 МПа, а в стали с УМЗ структурой – на 300 МПа. Дополнительный отжиг восстанавливает это значение до 400 МПа при сохранении заведомо более высокого значения предела текучести, равного 710 МПа.

Показано, что значение ударной вязкости в низкоуглеродистой стали после деформационно-термической обработки остаются на высоком уровне вплоть до минус 196 °С и составляет величину $KCV = 1,4–1,6$ МДж/м², в то время как в мелкозернистом состоянии ударная вязкость стали соответствует уровню $KCV = 0,1$ МДж/м².

Таким образом, после деформационно-термической обработки низкоуглеродистая сталь демонстрирует более высокие низкотемпературные механические свойства по сравнению с исходным мелкозернистым состоянием.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта № 18-9-1-20 УрО РАН (Программа «Арктика»).

ИНКУБАЦИОННЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ СТРЕСС-КОРРОЗИИ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Сильвестров С.А., Гумеров А.К.

ООО «Астрапроект», г. Казань, 102 А, ул. Ямашева, 420133, Россия,
e-mail: aAstra@mail.ru

Одной из нерешенных проблем в трубопроводном транспорте является недостаточная изученность явления стресс-коррозии (коррозионного растрескивания под напряжением – КРН), которая часто наблюдается на магистральных газопроводах и практически не проявляется на магистральных нефтепроводах, несмотря на то что эти трубопроводы построены по одним строительным нормам практически из одинаковых труб, эксплуатируются при близких условиях. Это, во-первых, не позволяет найти эффективные методы борьбы с растрескиванием на магистральных газопроводах, во-вторых, не дает возможности ответить на важный вопрос, надо ли опасаться в дальнейшем такого же массового развития коррозионного растрескивания на магистральных нефтепроводах.

В работе поставлена задача на основе анализа различных проявлений растрескивания трубопроводов, изучения известных особенностей и закономерностей, дополнительных экспериментальных исследований найти механизмы развития этого явления, построить физическую модель и на ее основе попытаться ответить на поставленные вопросы.

В результате сопоставления и синтеза известных и вновь полученных сведений, анализа возможных механизмов развития явлений с учетом всех особенностей выстроена логически стройная физическая модель коррозионного растрескивания под напряжением подземных трубопроводов, которая позволяет объяснить все наблюдаемые закономерности данного вида разрушения. Модель основана на определяющей роли водорода, указывает возможные источники водорода на подземных трубопроводах, закономерности взаимодействия водорода с металлом трубопровода, показывает причины повышения внутренних напряжений и растрескивания стенки.

Согласно предложенной модели, коррозионное растрескивание под напряжением протекает последовательно в несколько стадий. Первая стадия – инкубационный период развития, когда растрескивания еще нет, но внутри металла труб происходят существенные изменения – рост внутренних напряжений вследствие накопления газовых молекул H_2 и CH_4 на границах зерен кристаллической структуры. Одновременно происходят структурные изменения в кристаллах, обезуглероживание и рост зерен. Неиссякаемым источником водорода является грунтовая вода вокруг подземного трубопровода в условиях действия электрохимической защиты. В местах, где изоляция потеряла адгезию к металлу, катионы водорода H^+ восстанавливаются до состояния атомов H , которые затем легко проникают в металл в виде протонов и электронов по отдельности. Проникновению водорода в металл способствует наличие растягивающих напряжений в стенке высоконагруженных трубопроводов.

Вторая стадия – зарождение микротрещин, объединение в макротрещины и их рост. Третья стадия – рост макротрещин до критических размеров и разрушения трубопровода.

Фактически в настоящее время методами диагностики контролируется только второй период развития КРН, начиная с таких размеров трещин, которые могут быть зафиксированы магнитными внутритрубными снарядами-дефектоскопами.

Предложенная физическая модель получила экспериментальное подтверждение путем исследования концентрации водорода в стенке трубопровода. Также установлено, что существует определенный предел для растягивающих напряжений, который можно назвать пределом стресс-коррозии, аналогично другим пределам (текучести, усталости и др.). Интенсивное внедрение водорода происходит тогда, когда напряжения превышают предел стресс-коррозии, чем и объясняется КРН на магистральных газопроводах.

На основе данной физической модели сделан вывод, что магистральные нефтепроводы в настоящее время в основном находятся на стадии инкубационного развития КРН, а в зонах концентрации напряжений КРН развивается, но «спрятан» за другими локальными процессами.

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Зайцев Н.Л., Сильвестров С.А.

ООО «Астрапроект», г. Казань, 102 А, ул. Ямашева, 420133, Россия,
e-mail: aAstra@mail.ru

Оценке остаточного ресурса магистральных трубопроводов по признаку деформационного старения посвящено много работ. Однако предлагаемые подходы и получаемые результаты неоднозначны и противоречивы. Наиболее достоверный метод оценки деградации механических свойств – сопоставление результатов механических испытаний металла труб в исходном состоянии (на момент начала эксплуатации) и в процессе длительной эксплуатации (на момент проведения обследования). Но отсутствие архивов, в которых содержались бы данные об исходных механических характеристиках труб, уложенных в определенные места трубопровода, не позволяет проводить такие сопоставления.

Эту проблему в разных научных центрах пытались решать разными методами. Одни авторы за базу сравнения принимали механические характеристики труб из аварийного запаса или данные из отдельных сертификатов на ранее поставленные трубы. Другие предлагали восстанавливать исходные свойства металла труб путем термической обработки. Оба подхода имеют недостатки, содержат элементы случайности и поэтому могут привести к ошибочным выводам. Нами предложена методика, которая исключает некоторые из характерных ошибок. Методика основана на следующих экспериментально проверенных положениях.

1. Изменение механических свойств металла происходит по механизму деформационного старения. За предельное состояние принимается такая накопленная пластическая деформация ε_3 , при которой хотя бы один из стандартных механических свойств металла (σ_T , σ_B , σ_T/σ_B , δ , KCV, KCU⁻⁴⁰) достигает предельного допустимого уровня, установленного нормами.

2. Накопленная деформация напрямую связана с дислокационной структурой металла, которая при длительной эксплуатации претерпевает некоторые изменения.

3. От той же дислокационной структуры металла зависит и коэрцитивная сила. Поэтому, измеряя коэрцитивную силу, можно получить представление и о накопленной пластической деформации.

4. Восстановительный отжиг образцов металла возвращает коэрцитивную силу до состояния листа H_c^J независимо от степени пластической деформации до отжига. Более того, многократное деформирование металла до различных степеней пластической деформации и последующий восстановительный отжиг после каждого нагружения возвращает коэрцитивную силу до исходного уровня с разбросом в пределах не более 3 % .

5. Операция экспандирования труб при изготовлении приводит к пластической деформации металла до уровня $\varepsilon = 0,012$. Поэтому правка отоженной заготовки и последующая деформация на величину 1,2 % приводит к такому же значению коэрцитивной силы, как и формовка трубы из листа и последующее ее экспандирование.

6. Остаточный ресурс металла $T_{ост}$ определяется по формуле $T_{ост} = (\Delta\varepsilon_{кр} \cdot T_3) / \varepsilon_3$, где T_3 – время эксплуатации до момента обследования; ε_3 – накопленная за время эксплуатации пластическая деформация; $\Delta\varepsilon_{кр}$ – критический прирост пластической деформации, при котором достигается предельное состояние.

7. Определение величин ε_3 и $\Delta\varepsilon_{кр}$ основано на изучении взаимосвязи этих параметров с коэрцитивной силой металла H_c . Как показали исследования, при термообработке металла коэрцитивная сила возвращается в исходное состояние и при последующем деформировании опять повышаться по некоторой кривой. Зная эту кривую и измеряя коэрцитивную силу при обследовании трубопроводов, можно оценить остаточный запас пластических деформаций $\Delta\varepsilon_{кр}$ и соответствующее время $T_{ост}$.

Методика отработана на участке газопровода «Бухара–Урал».

ПОВЫШЕНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМАЦИОННО СТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Скорынина П.А.¹, Макаров А.В.^{1,2}, Волкова Е.Г.², Осинцева А.Л.¹

¹Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия,
e-mail: polina.skorynina@mail.ru

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
г. Екатеринбург, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Россия

Наноструктурирующая фрикционная обработка скользящим индентором является эффективным методом повышения прочностных и трибологических свойств метастабильной аустенитной хромоникелевой стали 12X18H10T [1, 2]. Представляет интерес рассмотреть особенности фрикционной обработки аустенитной стали с повышенным содержанием никеля (14,17 мас. %), стабилизирующего аустенит к деформационному $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращению, поскольку наличие мартенсита деформации в поверхностном слое может отрицательно влиять на коррозионные свойства стали.

Цель работы – изучение влияния фрикционной обработки скользящим полусферическим индентором на структуру, фазовый состав, микромеханические и трибологические характеристики поверхностных слоев аустенитной нержавеющей стали 03X16H14M3T.

Фрикционную обработку проводили при нагрузке на индентор $P = 294$ Н, и 7 сканирований индентором в безокислительной среде аргона.

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, в результате сильной пластической деформации, реализуемой при фрикционной обработке, в тонком (5–10 мкм) поверхностном слое аустенитной нержавеющей стали 03X16H14M3T наблюдается сильное диспергирование структуры: формируются фрагментированные нанокристаллические (с размерами кристаллитов менее 100 нм и большеугловыми границами) и субмикроструктурные (с размером кристаллитов более 100 нм) аустенитные структуры. Рентгеновский фазовый анализ исследуемой стали после фрикционной обработки показал, что объемная доля мартенсита деформации на поверхности не превышает 2 об. %. Таким образом, сталь является деформационно-стабильной даже в условиях интенсивной пластической деформации, реализуемой фрикционной обработкой в поверхностном слое стали.

Фрикционная обработка обеспечивает деформационное упрочнение стали 03X16H14M3T, не уступающее по эффективности упрочнению метастабильной стали 12X18H10T [1, 2]. Значение микротвердости на поверхности стали 03X16H14M3T возрастает от 290 $HV_{0,025}$ до 730 $HV_{0,025}$. Также по данным кинетического микроиндентирования установлено, что поверхность исследуемой стали после фрикционной обработки характеризуется повышенными характеристиками прочности и сопротивления упруго-пластическому деформированию. Показано, что в результате наноструктурирующей фрикционной обработки достигается рост износостойкости стали 03X16H14M3T в 4–10 раз в условиях граничного трения (при испытаниях на трение скольжения со смазкой по стальному контртелу).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790148-1 и государственного задания ФАНО России по теме «Структура» № 01201463331 (проект № 18-10-2-39) и при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-38-00561 мол а. Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН и ЦКП «Электронная микроскопия» УрО РАН – отделе электронной микроскопии «Испытательного центра нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН.

Литература

1. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12Х18Н10Т наноструктурирующей фрикционной обработкой / А. В. Макаров, П. А. Скорынина, А. Л. Осинцева, А. С. Юровских, Р. А. Саврай // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2015. – № 4 (69). – С. 80–92.
2. Влияние технологических условий наноструктурирующей фрикционной обработки на структурно-фазовое состояние и упрочнение метастабильной аустенитной стали / А. В. Макаров, П. А. Скорынина, А. С. Юровских, А. Л. Осинцева // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118, № 12. – С. 1300–1311.

ВЛИЯНИЕ КАОЛИНИТА НА СВОЙСТВА ПТФЭ

Слепцова С.А., Лаукканен С., Гладкина Н.Н.,
Федосеева В.И., Григорьева Л.А.

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
58, ул. Беллинского, Якутск, 677000, Россия,
e-mail: ssard@yandex.ru

На сегодняшний день использование слоистых силикатов в качестве наполнителей является одним из самых перспективных направлений развития полимерного материаловедения. Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных разработкам композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), использование слоистых силикатов в качестве модификаторов в них не рассматривается. Прежде всего это связано с проблемой достижения эффективного адгезионного взаимодействия гидрофильных слоистых силикатов с неполярной полимерной матрицей с чрезвычайно низкой адгезионной активностью, которой характеризуется ПТФЭ. В связи с этим исследования способов, направленных на улучшение совместимости слоистых силикатов с ПТФЭ, представляются весьма актуальными.

Цель работы – исследование влияния на свойства ПТФЭ каолинита в зависимости от содержания гидратационной воды в его кристаллической структуре.

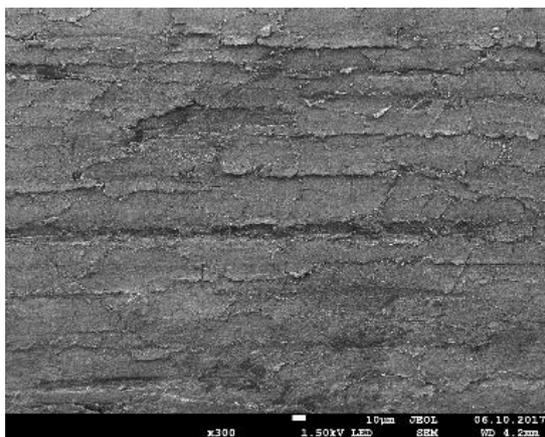
Для температурной обработки каолинита были взяты две точки – $T_1 = 250$ °С: соответствующая полному удалению адсорбированной воды из структуры каолинита и $T_2 = 850$ °С и соответствующая выделению межплоскостной и конституционной воды с образованием метакаолинита – промежуточного продукта обжига каолинита. Композиты получали методом сухого смешения, для чего термообработанный каолинит диспергировали в планетарной мельнице, а затем компоненты смешивали в лопастном смесителе.

Результаты

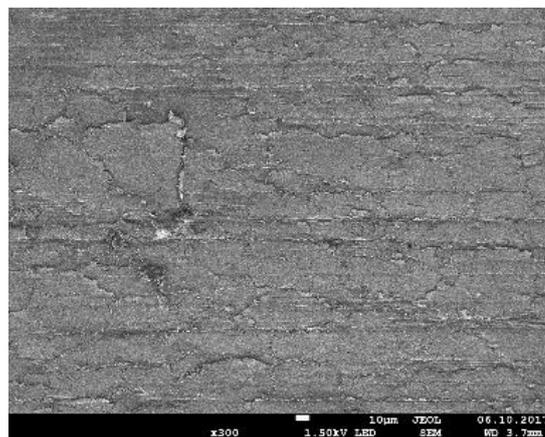
В таблице приведены физико-механические и триботехнические свойства композитов. Наблюдается значительное повышение износостойкости, а также повышение деформационно-прочностных характеристик композитов с повышением температуры обжига каолинита. Следует отметить, что на уровень износостойкости композитов не повлияло содержание гидратационной воды в структуре силиката. Повышение износостойкости сопровождается образованием на поверхности трения композитов сплошного силикатного слоя (рисунок). На микрофотографиях поверхностей трения видно что, сплошность слоя практически одинаково независимо от содержания и температуры обжига каолинита.

Композит	T, °С	ϵ_p , %	E, МПа	σ_p , МПа	I, мг/ч
ПТФЭ	-	310	318	18	125
+ 2 мас. % К	250	369	325	17	0,44
	850	399	434	21	0,56
+ 5 мас. % К	250	332	438	16	0,25
	850	462	293	19	0,25
+ 10 мас. % К	250	242	328	15	0,12
	850	343	366	17	0,11

Примечание: T – температура обработки каолинита; ϵ_p – относительное удлинение при разрыве; E – модуль упругости; σ_p – предел прочности при разрыве; I – скорость массового изнашивания.



a



б

Поверхности трения композитов, содержащих 2 мас. % (*a*) и 10 мас. % (*б*) каолинита, подвергнутого обжигу при температуре 250 °С и 850 °С соответственно (увеличение в 300 раз)

Выводы

Выявлено положительное влияние уменьшения количества гидратационной воды в структуре каолинита на деформационно-прочностные характеристики ПТФЭ, что может быть связано с улучшением совместимости каолинита с полимерной матрицей в процессе переработки. Показана эффективность использования каолинита для повышения износостойкости ПТФЭ и разработки материалов герметизирующего назначения на его основе, поскольку разработанные композиты отличаются оптимальными деформационно-прочностными и триботехническими характеристиками, необходимыми для уплотнительных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ (ГЗ № 11.1557.2017/4.6) и СВФУ (грант № 13-НИР).

ПОЛЗУЧЕСТЬ И РЕЛАКСАЦИЯ ПЛЕТЕНОЙ ПОЛИГЛИКОЛИДНОЙ ХИРУРГИЧЕСКОЙ НИТИ

Словиков С.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614000, Российская Федерация,
e-mail: sslovikov@ya.ru*

Широкое применение в медицине хирургических нитей со свойствами биodeградации обуславливает необходимость анализа механического поведения такого типа материалов и выработки рекомендаций для применения в конкретной клинической ситуации.

Существующие стандартные методики исследований механических свойств нитей не предоставляют хирургу достаточно информации для максимально точного выбора типа нитей в зависимости от клинической ситуации. Таким образом, исследование механического реологического поведения хирургических нитей, обладающих свойствами рассасывания в биологических тканях с течением времени [1] представляется актуальным.

Реологические свойства хирургических нитей в течение первых послеоперационных дней (до 15 суток) играют важную роль в реализации плотного прилегания ушиваемых тканей [2]. В это время происходят совместно два механических процесса. С одной стороны, при наличии постоянной деформации вследствие релаксационных свойств материала напряжения внутри нити падают, а с другой стороны – растут в результате процессов биodeградации и уменьшения площади сечения нити. Одновременный учет этого сложного процесса представляется возможным путем использования ядер вязкоупругого наследственного интегрального типа, полученных в результате экспериментов, максимально близких к реальным условиям применения нитей.

С целью анализа реологического поведения хирургических нитей и нахождения уравнений связи напряжений и деформаций была проведена серия механических испытаний плетеных полигликолидных нитей с антибактериальным покрытием. В ходе испытаний измерение деформации осуществлялось бесконтактным способом при помощи видеоэкстензометра, не влияющим на механическое поведение.

В результате проведенных исследований получены диаграмма ползучести, уравнения связи напряжений и деформаций при ползучести, диаграммы релаксации напряжений и уравнение связи напряжений и деформаций при релаксации.

По результатам исследований был сделан вывод о том, что исследуемый материал обладает физической нелинейностью, т. е. проявляется зависимость ядер релаксации и ползучести от величины деформации и напряженного состояния нити, при этом в диапазоне от 5 до 10 % обнаружено постоянство ядра релаксации. Прочностные свойства нити до 15 сут. несущественно зависят от процессов биodeградации. Основное влияние в механическое поведение нити вносят реологические процессы. После 15 дней биodeградационные процессы играют решающую роль в механическом поведении нити.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 9.7695.2017/П220.

Литература

1. Стратегия применения современных шовных материалов с антимикробными свойствами в абдоминальной хирургии / В. А. Самарцев, В. Э. Вильдеман, С. В. Словиков, В. А. Гаврилов, А. Е. Федоров // Пермский медицинский журнал. – 2010. – Т. 27, № 5. – С. 104–108.
2. Словиков С. В., Янкин А. С. Экспериментальные исследования биodeградации прочностных свойств хирургического шовного материала // Математическое моделирование в естественных науках. – 2016. – Т. 1. – С. 341–345.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА АМГ6/10 % SiC В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Смирнов А.С., Халевицкий Ю.В., Мясникова М.В.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия,
e-mail: smirnov@imach.uran.ru*

Металломатричные композиты (ММК) в сравнении со сплавами обладают более высокими характеристиками прочности, усталостного разрушения, жесткости, теплопроводности и электропроводности. В связи с этим проводится большой объем исследований, направленных на проектирование новых металломатричных композитов. Создание нового материала, имеющего практическую значимость, заключается не только в синтезе материала нового состава, но и в создании технологий, позволяющих обеспечить требуемый уровень физико-механических и функциональных свойств. Современный дизайн новых металломатричных композитов базируется на основе компьютерного моделирования представительного объема, являющегося структурно-неоднородной средой, состоящей из матрицы и армирующих частиц. Ансамбль взаимодействий матрицы, упрочняющих частиц и их связей между собой определяет механические свойства композита в целом. Поэтому в компьютерной модели представительного объема следует корректно задавать форму, механические свойства матрицы и армирующих частиц, а также указывать область и прочность контактов структурных составляющих композита. В современных работах по моделированию представительного объема контакт между структурными составляющими часто задается как связанная неразрывная граница, по которой не может происходить адгезионного разрушения.

Цель работы – определить корректность задания контактов в виде связанных неразрывных границ между структурными составляющими в металломатричном композите АМГ6/10 % SiC при моделировании его пластической деформации в условиях одноосного сжатия и растяжения. Композит АМГ6/10 % SiC был изготовлен по технологии порошковой металлургии, в результате чего он имеет ячеистую структуру, в которой частицы SiC сосредоточены по границам спеченных матричных гранул и образуют прослойку, содержащую частицы SiC и частично материал матрицы между ними. Эффективные свойства прослойки для условий пластического течения определяли по правилу смеси в зависимости от объемного содержания матрицы и наполнителя в материале композита. При этом использовали допущение о том, что объемная доля прослойки в материале ММК при деформации не меняется. Кривую сопротивления деформации для матрицы композита определили на основе индентирования и царапания на микроуровне. Представительный объем рассматривали как структурно-неоднородную среду, состоящую из связанных областей, моделирующих структурные составляющие ММК. По результатам моделирования были построены зависимости напряжения деформирования от накопленной деформации для условий растяжения и сжатия. Данные зависимости были сравнены с аналогичными экспериментальными, полученными при испытаниях на макроуровне. Установлено, что кривые сжатия ММК, построенные по результатам экспериментов и моделирования, практически ложатся друг на друга, в то время как экспериментальные и рассчитанные кривые в условиях растяжения имеют расхождение. Это объясняется тем, что при моделировании не учитывались области спекания частиц матрицы, а также области со слабыми адгезионными связями между частицами, которые играют большую роль в условиях растягивающих напряжений для рассматриваемого композита. Таким образом, моделирование деформации композита при схемах нагружения с преобладанием растягивающих напряжений способно вносить существенную погрешность в результаты расчетов.

Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 16-08-00160 в части определения напряженно-деформированного состояния в структурных компонентах ММК АМГ6/10 % SiC при деформации в условиях комнатных температур, а также по плану работ темы № 0391-2016-0001 ИМАШ УрО РАН в части моделирования реологического поведения композитов.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОВКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА ХАРАКТЕР УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ8-1

Смирнова А.С.^{1,2}, Почивалов Ю.И.¹, Панин В.Е.^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия,
e-mail: nasO@mail2000.ru

Линейная сварка трением является технологией, позволяющей получать соединения трудно свариваемых материалов высокого качества. К преимуществам данного метода сварки относят быстрый сварочный цикл, высокий уровень КПД из-за локального нагрева, безопасность процесса. При этом данная технология может быть применена для деталей, не имеющих осевой симметрии.

Для повышения служебных характеристик сварных соединений применяют различные технологические методы, наиболее распространенным из которых является поверхностно-пластическое деформирование. Интенсивная пластическая деформация с помощью ультразвуковой ковки (УЗК) поверхностных слоев является наиболее эффективным методом повышения механических характеристик и осуществляется за счет энергии удара стального «бойка» об обрабатываемую поверхность материала.

В настоящей работе исследовано влияние ультразвуковой ковки поверхностных слоев сварных соединений титанового сплава ВТ8-1, выполненных линейной сваркой трением, на их усталостную долговечность. Проведен подробный фрактографический анализ микрорельефа поверхности разрушения сварного соединения, в результате малоцикловых усталостных испытаний.

В ходе линейной сварки трением исходная микроструктура сплава в области сварного шва существенно изменяется. Можно выделить характерные зоны, отличающиеся по травимости, размерам и форме зерен. Зона основного металла не испытывает заметных изменений и соответствует исходному состоянию.

В зоне сплавления образца формируется крупнокристаллическая структура с зернами, вытянутыми перпендикулярно плоскости сварки. На границе этой зоны наблюдается изменение ориентации зерен: зерна развернуты под углом к плоскости сварки. Наличие поворота зерен свидетельствует о значительной пластической деформации перпендикулярной плоскости сваривания.

Для исследования усталостных характеристик сварных соединений сплава ВТ8-1 были проведены малоцикловые усталостные испытания при напряжении 600 МПа. По результатам испытаний, УЗК поверхностных слоев повышает ресурс работы сварного соединения более чем в 2,5 раза.

Фрактографический анализ изломов разрушенных при малоцикловых испытаниях образцов показал, что разрушение исходных образцов проходит по границе зоны сплавления и зоны термического влияния – ближе к зоне сварного шва. Плоская радиальная зона движения фронта трещины представляет собой область зарождения усталостной трещины. Как следует из анализа фрактограмм, размер сколов при продвижении трещины в зоне ее зарождения имеет ширину около 2 мкм, что соответствует толщине пластин α' -фазы в структуре сварного шва. Дальнейшее распространение трещины приводит к образованию более развитого камневидного рельефа с вторичными трещинами, гребнями и ступеньками. Ускоренное распространение трещины привело к образованию чашечного микрорельефа размером ~ 2–7 мкм в зоне долома образца.

После УЗК зарождение трещины начинается с боковой поверхности образца, движется радиальным фронтом без рыхлого узора и едва различимыми гребнями отрыва. Микрорельеф зоны зарождения магистральной трещины свидетельствует о более вязком характере

роста усталостной трещины в материале после УЗК. Далее формируется протяженная зона распространения трещины с удлиненными ямками, сформированными в процессе сдвиговой деформации. На стадии лавинного разрушения в зоне долома наблюдаются более равноосные ямки, сформировавшиеся в процессе вязкого отрыва.

Ультразвуковая ударная обработка околошовной зоны и зоны термического влияния создает на обрабатываемой поверхности упрочненный высокодисперсный слой с высокой диспергирующей способностью. Таким образом, УЗК поверхностных слоев сварного соединения титанового сплава BT8-1 приводит к увеличению его усталостной долговечности и является эффективной обработкой, позволяющей повысить ресурс работы сварных соединений без применения комплекса термомеханических обработок.

АДГЕЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПОКСИДНОГО КЛЕЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ

Смирнова Е.О.¹, Веретенникова И.А.¹, Смирнов С.В.¹,
Пестов А.В.², Коновалов Д.А.¹, Осипова В.А.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия,

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского Уральского отделения Российской академии наук,
22, Софьи Ковалевской, Екатеринбург, 620990, Россия,
e-mail: evgeniya@imach.uran.ru

Одним из важных вопросов использования различных покрытий является оценка влияния микрогеометрии поверхности подложки на адгезионные характеристики наносимого материала.

Цель нашей работы – исследование влияния параметров шероховатости подложки на адгезионные свойства однокомпонентного эпоксидного клея ЭТП-2.

В качестве материала для исследования использовали покрытие на основе однокомпонентного эпоксидного клея ЭТП-2 горячего отверждения, разработанного в Институте органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН. Клей формируется на основе коммерчески доступных эпоксидных смол с эпоксидным числом 20–27 %, в качестве катализатора отверждения используется алкоксид титана(IV), синтез которого осуществляется путем реакции переэтерификации коммерчески доступных алкоксидов. Отверждение осуществляли по оптимизированным режимам, подобранным при проведении экспериментальных исследований свойств отвержденного материала в зависимости от вязкости клея и температурно-временного режима процесса. Получаемое покрытие может быть охарактеризовано как твердое и хрупкое. В качестве подложки использовали образцы с разной шероховатостью поверхности из пластины алюминий-магниевого сплава АМгб. Средняя толщина покрытий на подложке составляла 85 мкм. Определение топографии и параметров шероховатости поверхности подложки проводили на оптическом профилометре. Оценку поверхностных механических свойств (твердости и контактного модуля упругости) покрытий осуществляли с использованием комплекса NanoTriboindenter TI 950. Эксперименты на царапание (скретч-тест) проводили с применением универсальной испытательной машины Zwick-2.5. В качестве параметра оценки была выбрана величина поверхностной энергии адгезионного разрушения.

На основании проведенных экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы:

- различная микрогеометрия поверхности подложки не оказывает влияние на механические характеристики (твердость и контактный модуль) покрытия;
- шероховатость поверхности оказывает влияние на адгезионные свойства однокомпонентного эпоксидного клея ЭТП-2, проявляющиеся в увеличивающемся латеральном усилии при царапании и в изменении поверхностной энергии расслоения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-01154).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ШАРНИРНО ЗАКРЕПЛЕННОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКИ С ТРАНСВЕРСАЛЬНО-МЯГКИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Бадриев И.Б.¹, Макаров М.В.^{1,2}, Смирнова Е.В.¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
18, ул. Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,

²Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева,
10, ул. К.Маркса, Казань, 420111, Российская Федерация,
e-mail: lldar.Badriev1@mail.ru, makarovmaksim@mail.ru, ovsanka@ro.ru

Опыт эксплуатации и отработки объектов с применением трехслойных пакетов показал высокую эффективность трехслойных конструкций, а порой – их незаменимость (см., например, [1–3]). Настоящая работа посвящена изучению геометрически нелинейной задачи об изгибе шарнирно закрепленной трехслойной пластины с трансверсально-мягким наполнителем. По аналогии с [4] установлено, что среди перемещений точек срединной поверхности и касательных напряжений в наполнителе в состоянии равновесия имеют место только те, для которых обобщенный функционал Лагранжа имеет стационарные значения. При этом возникает обобщенная постановка задачи в виде нелинейного операторного уравнения в пространстве Соболева. Установлены свойства оператора – псевдомонотонность [5], ограниченная липшиц-непрерывность [6], коэрцитивность потенциала оператора и его квазипотенциальность [7]. Это дало возможность доказать теоремы существования задачи и сходимости предложенного в [8–10] двухслойного итерационного процесса. В среде Matlab разработан комплекс программ для реализации этого процесса. Проведены тестовые расчеты для модельных задач при различных видах нагружения пластины. Результаты численных экспериментов свидетельствуют об эффективности разработанного метода.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-01-00301, 17-08-01279, 18-38-00595).

Литература

1. Stambrel I. Honeycomp Construction Predominates in B-70 Structure // Spase-Aeronautiscs. – 1960. – Vol. 33, no. 6. – P. 110–113.
2. Badriev I. B., Makarov M. V., Paimushin V. N. Contact statement of mechanical problems of reinforced on a contour sandwich plates with transversally-soft core // Russian Mathematics. – 2017. – Vol. 61, no. 1. – P. 69–75.
3. Васильев В. В., Добряков А. А., Дудченко А. А. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов. – М. : МАИ, 1985. – 218 с.
4. Паймушин В. Н. Обобщенный вариационный принцип Рейсснера в нелинейной механике пространственных составных тел с приложениями к теории многослойных оболочек // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1987. – № 2. – С. 171–180.
5. Brezis H. Йquations et ийquations non-lинйaires dans les espaces vectoriels en dualitй // Annales de l'institut Fourier (Grenoble). – 1968. – Tome 18, no. 1. – P. 115–175. – DOI: 10.5802/aif.280.
6. Badriev I. B., Zadvornov O. A., Saddek A. M. Convergence Analysis of Iterative Methods for Some Variational Inequalities with Pseudomonotone Operators // Differential Equations. – 2001. – Vol. 37, no. 7. – P. 934–942.
7. Вайнберг М. М., Лаврентьев И. М. Нелинейные квазипотенциальные операторы // Доклады АН СССР. – 1972. – Т. 205, № 5. – С. 1022–1024.

8. Badriev I. B., Makarov M. V., Paimushin V. N. Longitudinal and transverse bending by a cylindrical shape of the sandwich plate stiffened in the end sections by rigid bodies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 158 (1), art. no. 012011.
9. Badriev I. B., Banderov V. V., Makarov M. V. Mathematical Simulation of the Problem of the Pre-Critical Sandwich Plate Bending in Geometrically Nonlinear One Dimensional Formulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 208 (1), art. no. 012002.
10. 10.Numerical Solution of the Issue about Geometrically Nonlinear Behavior of Sandwich Plate with Transversal Soft Filler / I. B. Badriev, G. Z. Garipova, M. V. Makarov, V. N. Paymushin // Research Journal of Applied Sciences. – 2015. – Vol. 10, no. 8. – P. 428–435.

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОРАМИ

Смолин А.Ю.^{1,2}, Шаломеева А.А.², Смолина И.Ю.³

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия,
e-mail: asmolin@ispms.ru

²Томский государственный университет, 36, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия,

³Томский государственный архитектурно-строительный университет,
2, пл. Соляная, Томск, 634003, Россия

Зависимость упругих, а в особенности прочностных свойств керамики, от содержания и морфологии пор до сих пор является важной и актуальной проблемой. Ранее авторами была построена трехмерная численная модель механического поведения пористой керамики на основе метода подвижных клеточных автоматов. На основе этой модели было изучено влияние на упругие и прочностные свойства керамики как размера, так и объемного содержания пор сферической формы. В данной работе в рамках построенной модели изучалось влияние длины и ориентации пор цилиндрической формы.

Общая методика по численному изучению морфологии пор на механические свойства керамики состояла в следующем. Для заданной морфологии (здесь это длина и ориентация пор) генерируется несколько образцов с индивидуальным расположением пор, получаемым с помощью датчика случайных чисел, по образцу кубической формы. Далее проводится моделирование по одноосному сжатию таких образцов и анализируются диаграммы их нагружения. Из этого анализа получаются значения упругого модуля и предела прочности при сжатии для каждого из образцов. Затем проводится анализ Вейбулла полученных механических свойств для группы образцов с заданной морфологией, в результате которого определяются математическое ожидание и дисперсия этих свойств. Описанная процедура далее выполняется для образцов большего размера. Проводится анализ сходимости математических ожиданий вычисленных механических свойств с увеличением размера образцов, в результате которого определяется представительный образец, свойства которого принимаются за искомые характеристики для заданной морфологии.

В результате численного моделирования показано, что наибольшее влияние на прочность модельных образцов оказывает ориентация цилиндрических пор. При этом наиболее эффективными следует считать образцы не с одинаковой ориентацией вытянутых пор, а с ее дисперсией, что позволяет получать изотропный материал.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ОБРАЗЦОВ КЕРАМИКИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ

Смолин И.Ю.^{1,2}, Кульков А.С.^{1,2}, Микушина В.А.², Макаров П.В.^{1,2},
Красновейкин В.А.^{1,2}

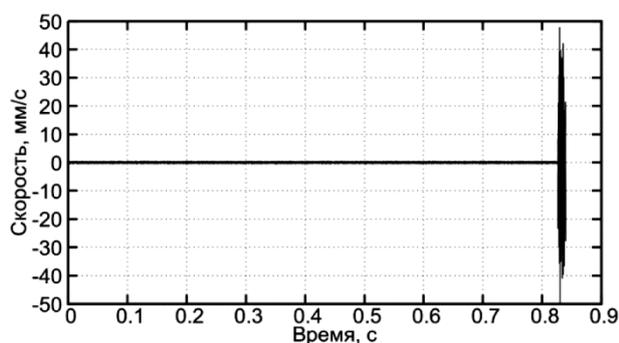
¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия,

²Томский государственный университет, 36, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия,
e-mail: smolin@ispms.tsc.ru, 727@ispms.ru, mikushina_93@mail.ru, pvm@ispms.ru

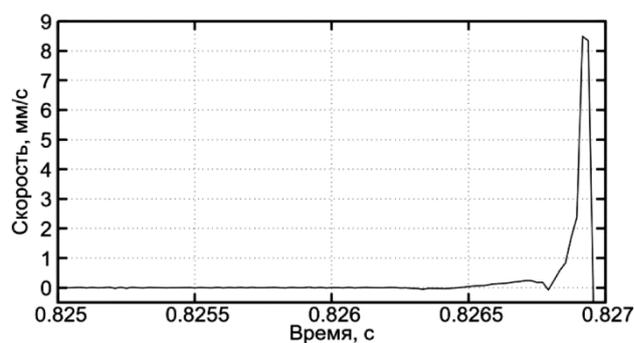
Известно, что заключительная стадия макроскопического разрушения развивается как катастрофа в сверхбыстром режиме с обострением [1, 2]. Однако особенности этой стадии не достаточно хорошо изучены. Для прогноза разрушения особый интерес представляет как сама стадия сверхбыстрого катастрофического разрушения, так и механическое поведение среды в состоянии самоорганизованной критичности перед выходом разрушения на режим обострением [3].

Цель работы – экспериментальное изучение механического поведения хрупких керамических образцов на стадии накопления повреждений и выход на режим с обострением перед катастрофическим разрушением.

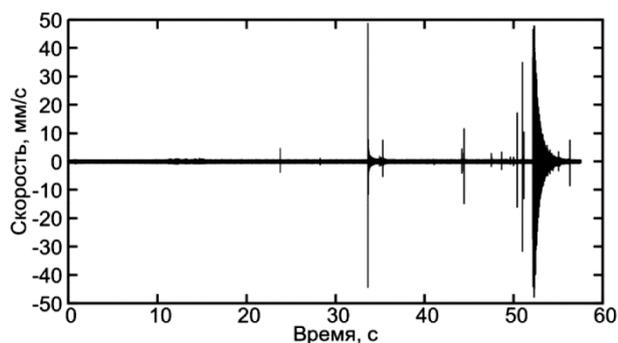
Образцы керамики на основе оксида алюминия испытывались на трехточечный изгиб и одноосное сжатие. Скорости смещения поверхности нагруженных образцов записывались с помощью лазерного доплеровского вибromетра фирмы Polytec. Частота записи при измерениях составляла от 48 до 250 кГц, точность измерения скорости по амплитуде – 0,1 мкм/с. Примеры эволюции скорости свободной поверхности керамических образцов при образовании одиночных трещин и при выходе на полное разрушение представлены на рисунке.



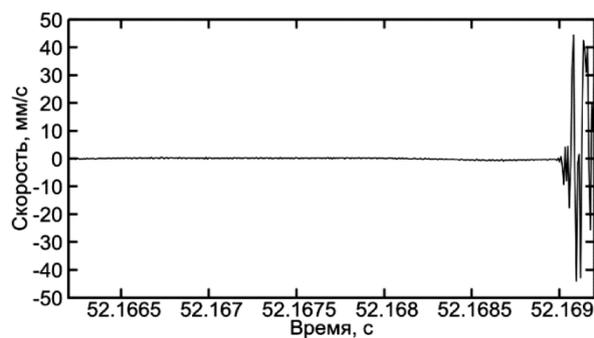
а



б



в



г

Изменение скорости свободной боковой поверхности керамических образцов при трехточечном изгибе (а, б) и при сжатии (в, г) в разные промежутки времени

На основе анализа полученных результатов выявлен ряд особенностей механического отклика перед катастрофическим разрушением, связанных со стадийностью изменения скорости свободной поверхности.

Изучены типичные зависимости от времени скорости свободной поверхности на стадии перехода от квазистационарного режима накопления повреждений к катастрофическому макроскопическому разрушению керамических образцов. Фактически, только последние 10 мс скорости смещения превышают шум в 2–3 раза и могут быть приняты во внимание. Этот этап отвечает развитию режима с обострением. Развитию разрушения как макрокатастрофы можно условно отнести последнюю 1 мс перед разрушением. На протяжении всей квазистационарной стадии при трехточечном изгибе наблюдается шум от внешних воздействий, по амплитуде соизмеримый с полезным сигналом, поэтому эта стадия не анализировалась. При сжатии образцов на фоне шума наблюдаются кратковременные выбросы полезного сигнала, соответствующие образованию микроповреждений. Очевидно, что микроповреждения генерируют более высокие частоты. Все представленные результаты измерений существенно выше шумового порога.

Научное исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., направление III.23 и при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Литература

1. Макаров П. В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 3. – С. 19–35.
2. Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Современные проблемы нелинейной динамики. – М. : УРСС, 2002. – 356 с.
3. Кочарян Г. Г., Новиков В. А. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18, № 4. – С. 94–104.

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОМУ ИЗНАШИВАНИЮ NiCrBSi ПОКРЫТИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Макаров А.В.^{1,2,3}, Соболева Н.Н.^{1,3}, Гибзун М.С.^{2,3},
Малыгина И.Ю.¹, Коробов Ю.С.³

¹Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия,
e-mail: natashasoboleva@list.ru,

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Россия,

³Уральский федеральный университет, д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия

Широкое применение для улучшения качества изделий, эксплуатируемых в условиях значительного нагрева (валки и рольганги в станах горячей прокатки, штампы горячего деформирования, детали теплообменных аппаратов, турбин, твердотопливных котлов и др.), находят покрытия из сплавов системы Ni–Cr–B–Si. Уникальные возможности для расширения высокотемпературного применения NiCrBSi покрытий открывает обнаруженный в работах [1, 2] новый эффект повышения теплостойкости (до 1000 °С и более) полученных газопорошковой лазерной наплавкой NiCrBSi-покрытий в результате высокотемпературного (при 1000–1075 °С) отжига, формирующего в покрытии термически стабильные износостойкие структуры каркасного типа с крупными упрочняющими фазами (карбидами и боридами хрома).

Цель настоящего исследования – изучение возможности повышения комбинированной лазерно-термической обработкой [1, 2] износостойкости NiCrBSi покрытия в условиях значительного фрикционного нагрева, реализуемого в условиях трения скольжения с повышенными (более 5 м/с) скоростями.

Для наплавки непрерывным CO₂-лазером на пластину из стали Ст3 использовали самофлюсующийся порошок NiCrBSi марки ПГ-10Н-01 состава, % мас: 18,2 % Cr; 3,3 % В; 4,2 % Si; 0,92 мас. % С; 2,6 % Fe; остальное – Ni. Толщина покрытия после двухслойной наплавки и шлифования составляла 0,9–1,1 мм. Часть образцов подвергали комбинированной лазерно-термической обработке, заключающейся в проведении после наплавки отжига при температуре 1025 °С с последующим охлаждением в вакуумной печи.

В трибологических испытаниях на трение скольжения на воздухе по диску из стали Х12М (схема «палец–диск») установлено, что комбинированная обработка, включающая лазерную наплавку и последующий высокотемпературный отжиг, обеспечивает снижение интенсивности изнашивания и линейного износа в 1,8 раза при скоростях скольжения 6,1 и 9,3 м/с, обуславливающих значительный фрикционный нагрев поверхностей трения. Следовательно, комбинированная лазерно-термическая обработка значительно повышает фрикционную теплостойкость хромоникелевого покрытия. Отмеченный рост сопротивления тепловому изнашиванию связан с формированием в процессе отжига покрытия крупных упрочняющих фаз – боридов хрома CrB и карбидов хрома Cr₇C₃. С использованием сканирующей микроскопии и оптической профилометрии проанализировано влияние комбинированной (с отжигом) обработки на механизмы изнашивания покрытия в условиях высокоскоростного трения. Результаты трибологических испытаний покрытия обсуждены также с позиций влияния комбинированной обработки на его микромеханические свойства, установленные измерениями микротвердости по методу восстановленного отпечатка и кинетическим микроинденсированием с определением прочностных, пластических и упругих характеристик.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России по теме «Структура» № 01201463331 и государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АА-АА-А18-118020790147-4.

Литература

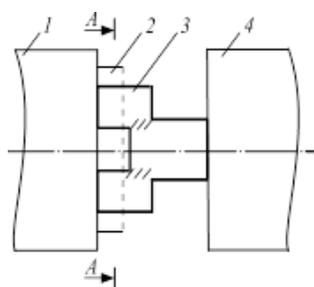
1. Формирование износостойкого хромоникелевого покрытия с особо высоким уровнем теплостойкости комбинированной лазерно-термической обработкой / А. В. Макаров, Н. Н. Соболева, И. Ю. Малыгина, А. Л. Осинцева // МиТОМ. – 2015. – № 3. – С. 39–46.
2. Способ получения теплостойкого покрытия : пат. 2492980 Рос. Федерация / Макаров А. В., Соболева Н. Н., Малыгина И. Ю., Осинцева А. Л. – опубл. в БИМП. – 2013. – № 26.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Соковиков М.А., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
1, Академика Королева, Пермь, 614013, Россия,
e-mail: sokovikov@icmm.ru

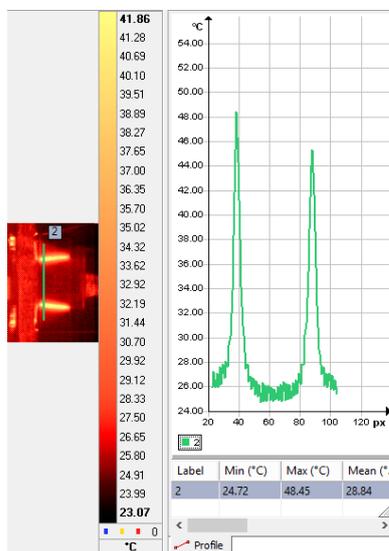
Проведено экспериментальное и теоретическое исследование механизмов локализации пластической деформации при динамическом деформировании металлов. Механизмы связываются с коллективными эффектами в ансамбле микродефектов в пространственно-локализованных областях. Инфракрасное сканирование *in-situ* зоны неустойчивости и последующее изучение дислокационной субструктуры подтвердили предположение о решающей роли неравновесных переходов в ансамблях дефектов при развитии локализованного пластического течения. На основе уравнений, отражающих связь неравновесных переходов с механизмами структурной релаксации и пластического течения, проведено моделирование локализации пластической деформации.



а



б



в

- Рис. 1. а) схема нагружения образца на стержне Гопкинсона–Кольского: 1 – входной стержень, 2 – рамка, 3 – образец, заштрихованные области находятся в состоянии близком к чистому сдвигу, 4 – выходной стержень;
б) образец специальной формы после испытания, сплав Д16;
в) изображение образца в инфракрасных лучах в процессе испытания образца из сплава Д16 и график зависимости температуры от координаты в выбранный момент времени. Максимальная температура по периметру отверстия 48 °С

Термодинамика процесса деформирования с целью идентификации характерных стадий локализации деформации исследовалась «in-situ» регистрацией температурных полей с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Основные технические характеристики камеры: чувствительность не менее 25 мК при 300 °К, спектральный диапазон 3–5 мкм, максимальный размер кадра 320×240 точек.

В процессе деформирования на стержне Гопкинсона–Кольского с помощью инфракрасной камеры в режиме реального времени установлено, что значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают ~48 °С для сплава Д16 (рис. 1).

На оригинальной баллистической установке по исследованию пробивания были нагружены образцы из сплава алюминия АМг6. При высокоскоростном взаимодействии ударника с мишенью реализуется разрушение в виде формирования и выноса пробки. Для исследования распределения пластических деформаций на тыльной поверхности мишени в процессе формирования и выноса пробки использовалась инфракрасная камера CEDIP Silver 450M. При пробивании преграды из АМг6 со скоростью 417 м/с температура не превышает 341 °С (рис. 2).

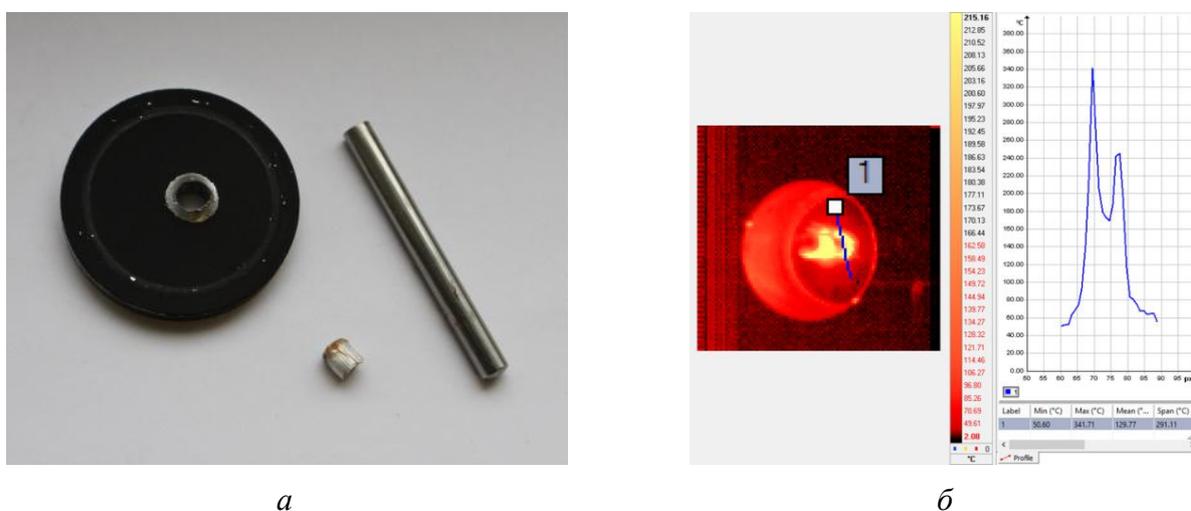


Рис. 2. а) пробитая мишень, выбитая пробка и деформированный ударник; б) инфракрасные образ отверстия после пробивания и график зависимости температуры от координаты в выбранный момент времени.

Данные экспериментальных исследований, изучение структуры деформированных образцов [1], а также результаты численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале [2, 3], позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении обусловлен структурно- кинетическими переходами в ансамблях микродефектов.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 17-08-00905_a, 17-41-590149 p_a, 16-48-590534 p_a, 18-08-01186_a.

Литература

1. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands / M. A. Sokovikov, D. A. Bilalov, V. A. Oborin, V. V. Chudinov, S. V. Uvarov, Yu. V. Bayandin, O. B. Naimark // Fracture and structural integrity. – 2016. – No. 38. – P. 280–287.
2. Наймарк О. Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 45–72.
3. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу / Д. А. Билалов, М. А. Соковиков, В. В. Чуудинов, В. А. Оборин, Ю. В. Баяндин, А. И. Терехина, О. Б. Наймарк // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 103–112.

ПОСТРОЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ СКОРОСТЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОСОБОГО СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ

Соловей В.Д.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия,
e-mail: SoloveiVD@yandex.ru*

Формирование периодических мезоструктур в металлах при прокатке [1] связано с потерей устойчивости деформируемых полос [2]. Исследование деформации твердого тела на устойчивость производится по отношению к некоторому множеству возмущений скоростей перемещений, удовлетворяющих дифференциальным уравнениям, вытекающим из законов сохранения, уравнениям состояния и граничным условиям [3]. прокатываемая полоса имеет сложную форму области течения, что усложняет решение упомянутой нестационарной краевой задачи для возмущений скоростей перемещений.

В работе рассматриваются возмущения медленного особого стационарного течения вязкопластической полосы при прокатке [4]. Возмущение величины f обозначается как $\tilde{f} \equiv \delta f$, где δ – оператор изохронного, изокоординатного варьирования. Возмущения величин относятся к произвольному моменту времени и являются функциями координат. Доказываем, что функционал

$$\tilde{G}^+ = \int_S \tilde{s}_{ij}^+ \tilde{\varepsilon}_{ij}^+ dS + \int_S \rho \tilde{v}_{i,t}^* \tilde{v}_i^+ dS, \quad (1)$$

определенный на множестве кинематически возможных возмущений скоростей перемещений \tilde{v}_i^+ , удовлетворяющих уравнению несжимаемости и соответствующим граничным условиям в произвольный момент времени, для действительных возмущений скорости перемещения \tilde{v}_i принимает минимальное значение. Возмущения ускорений в произвольный момент времени $\tilde{v}_{i,t}^*$ известны.

В произвольный момент времени для каждого заданного поля возмущений ускорений $\tilde{v}_{i,t}^*$, минимизируя функционал (1), можно решить соответствующую краевую задачу для возмущений скоростей перемещений \tilde{v}_i . Для произвольного момента времени, варьируя возмущения ускорений $\tilde{v}_{i,t}^*$, можно получить искомое множество возмущений скоростей перемещений \tilde{v}_i для исследования особого стационарного течения вязкопластической полосы при прокатке на устойчивость [5].

Литература

1. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М. : Металлургия, 1978. – 568 с.
2. Штремель М. А. Прочность сплавов. Ч. II. Деформация. – М. : Изд-во МИСИС, 1997. – 526 с.
3. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М. : Мир, 1973.
4. Соловей В. Д. Теорема Пригожина для процесса прокатки вязкопластической полосы // Инженерно-физический журнал. –2015. –Т. 88, № 3. – С. 545–551.
5. Соловей В. Д., Трухин В. Б. Устойчивость процесса осадки вязкопластического параллелепипеда без трения // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 2. – С. 9–13.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ШАРНИРНО ОПЕРТОЙ БАЛКИ С ГРУЗОМ

Самсонов А.А., Соловьев С.И.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
д. 18, ул. Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,
e-mail: anton.samsonov.kpfu@mail.ru, sergei.solovvey@kpfu.ru*

Исследуется задача о собственных колебаниях неоднородной балки переменного сечения шарнирно опертой в граничных точках с присоединенным грузом во внутренней точке. Задача описывается дифференциальной задачей на собственные значения четвертого порядка с переменными коэффициентами, граничными условиями шарнирного опирания и дополнительными условиями сопряжения в точке крепления груза, содержащими спектральный параметр. Задача на собственные значения имеет последовательность положительных простых собственных значений с предельной точкой на бесконечности. Этим собственным значениям соответствует полная ортонормированная система собственных функций.

Цель работы – исследование предельных свойств собственных значений и собственных функций при увеличении величины массы присоединенного груза до бесконечности. В работе сформулированы предельные дифференциальные задачи на собственные значения четвертого порядка. Установлена сходимость собственных значений и собственных функций исходной задачи к собственным значениям и собственным функциям предельных задач на собственные значения при увеличении величины массы присоединенного груза до бесконечности. Исходная задача и предельные задачи аппроксимируются сеточными схемами метода конечных разностей на равномерной сетке. Исследуется сходимость и погрешность приближенных решений. Для иллюстрации полученных теоретических результатов проведены численные эксперименты для модельной задачи. Теоретические результаты работы могут быть обобщены для задач о собственных колебаниях пластин и оболочек с присоединенными грузами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-01-00301, 17-08-01279).

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЯ С УПРУГО ПРИСОЕДИНЕННЫМ ГРУЗОМ

Самсонов А.А., Соловьев С.И., Соловьев П.С.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
д. 18, ул. Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,
e-mail: anton.samsonov.kpfu@mail.ru, sergei.solovyev@kpfu.ru,
pavel.solovyev.kpfu@mail.ru*

Исследуется задача о собственных колебаниях неоднородного стержня переменного сечения, жестко закрепленного в граничных точках, с упруго присоединенным грузом во внутренней точке. Задача описывается дифференциальной задачей на собственные значения второго порядка с переменными коэффициентами, граничными условиями жесткого закрепления и дополнительными условиями сопряжения в точке упругого присоединения груза, содержащими нелинейно спектральный параметр. В работе установлено существование последовательности положительных простых собственных значений с предельной точкой на бесконечности. Этим собственным значениям соответствует нормированная система собственных функций. Исходная нелинейная дифференциальная задача на собственные значения аппроксимируются сеточной схемой метода конечных элементов на равномерной сетке. Исследуется сходимость и погрешность приближенных собственных значений и приближенных собственных элементов. Для иллюстрации полученных теоретических результатов проведены численные эксперименты для модельной задачи. Теоретические результаты работы могут быть обобщены для задач о собственных колебаниях балок, пластин и оболочек с упруго присоединенными грузами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-01-00301, 17-08-01279).

SELECTING LINES OF RESEARCH OF METHODS FOR CREATING BIOINERT ALLOYS WITH LOW-FREQUENCY MODULUS OF FIRST GENUS

Sosnin K.V., Romanov D.A., Gromov V.E., Filyakov A.D.,
Ysova A.V., Boykova A.V.

*Siberian State Industrial University,
42 Kirova St., Novokuznetsk, 654007, Russia,
e-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru*

Artificial biomaterials are used everywhere. One of the most used artificial biomaterials is titanium, in view of good biocompatibility, but the main disadvantage of pure titanium and titanium-based alloys is their high Young's modulus. Alternatively, $\delta+\beta$ titanium alloys can be used. The use of traditional production methods with respect to the alloys in question is difficult due to a large difference in the melting temperature and specific gravity of the components. The solution to this problem can be the use of powder metallurgy methods. However, they also have a number of features.

The use of artificial biomaterials becomes vital due to their special influence on the quality and life expectancy of a person. In this connection, a modern artificial biomaterial used to create implants must have the following properties: the absence of undesirable chemical reactions with tissues and interstitial fluids; the absence of corrosion in the environment of the human body; mechanical strength close to bone strength; crack resistance; wear resistance and the absence of traces of abrasive wear; the absence of reactions from the immune system of the body; stimulation of the formation of bone tissue (osteosynthesis); the presence of pores of a certain size on the surface of the implant, which are necessary for the germination of bone tissue in the implant.

In Russia, due to good biocompatibility, high specific strength, excellent corrosion resistance and lower elastic moduli compared to stainless steels and Co-Cr-Mo, commercially pure VT1-0 titanium and titanium alloys Ti-4Al-6V (VT 6), Ti-2.5Al-5Mo-5V (VT 16), as well as their foreign counterparts, are typical implant materials. Despite their vast field of application, they are very extensively used in medicine: dentures, femoral and knee joint implants, clips, nails, screws, plates; the main problem of implants created using the materials discussed above is the high Young's modulus (above 100 GPa). In this regard, the bulk of the mechanical load is distributed to the bones, and this leads to their wear and tear.

An alternative to existing biomaterials can be martensitic metastable $\delta+\beta$ titanium alloys having a lower modulus of elasticity. Examples of such alloys are Ti-35Nb-7Zr-5Ta, Ti-24Nb-4Zr-8Sn, Ti-Nb and others. The production of these alloys is possible due to the capability of Ti for allotropic transformations at 882.3 °C. Below this temperature, it has a hexagonal close-packed lattice, also termed the δ -phase, whereas above this temperature the lattice is volume-centered cubic, referred to as the β phase. The addition of alloying elements to alloys can have a significant effect on the phase composition and mechanical properties of Ti-based alloys. The reduction of Young's modulus is associated with β -stabilizing elements, which break and reduce the binding strength of the lattice due to the expansion of the volume of the unit cell.

This work was supported in part by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-32-00075 mol_a.

ЗАДАЧА О ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЕ ДЛЯ ВЫРОЖДАЮЩЕГОСЯ НЕЛИНЕЙНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С ЗАДАННОЙ ФУНКЦИЕЙ ИСТОЧНИКА

Казаков А.Л.^{1,2}, Кузнецов П.А.¹, Спевак Л.Ф.²

¹ИДСТУ СО РАН, 134, ул. Матросова, Иркутск, 664033, Россия,

²ИМАШ УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620034, Россия

В работе рассмотрено вырождающееся нелинейное параболическое уравнение теплопроводности с источником [1–3]

$$u_t = uu_{xx} + \frac{1}{\sigma} u_x^2 + F(u), \quad F(0) = 0, \quad (1)$$

для которого исследуются решения типа тепловой волны, распространяющейся по холодному фону с конечной скоростью. Уравнение (1) используется при описании процессов диффузии и фильтрации [1], лучистой теплопроводности [2] и т. п.

Рассматривается краевая задача для уравнения (1) с заданным тепловым фронтом, т. е. при краевом условии вида

$$u(t, x) \Big|_{x=a(t)} = 0, \quad a(0) = 0, \quad a'(0) > 0. \quad (2)$$

Ранее задача (1) и (2) рассматривалась в научной школе А.Ф. Сидорова [3] с использованием аналитических и численных методов [4] в случае $F \equiv 0$, т. е. без источника.

В настоящей работе доказано следующее новое утверждение.

Теорема. Пусть $F(u)$ и $a(t)$ – аналитические функции в окрестности $u = 0$ и $t = 0$ соответственно. Тогда задача (1) и (2) имеет единственное нетривиальное аналитическое решение в окрестности $t = 0$, $x = a(0)$.

Решение задачи (1) и (2) строится в виде характеристического ряда, сходимость которого доказывается методом мажорант.

Подробно изучен один содержательный частный случай, в котором тепловая волна является инвариантной и ее построение сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения. В этом случае задача допускает инвариантное (частично-автомодельное) решение. Для численного построения инвариантных тепловых волн предложен алгоритм на основе метода граничных элементов, решены тестовые примеры. Сравнение результатов расчетов с известным точным решением показало высокую точность разработанных алгоритмов. Результаты расчетов хорошо согласуются с решениями с помощью алгоритмов, разработанных в работе [5].

На основе вычислительного эксперимента проведен качественный анализ поведения инвариантных тепловых волн при различных значениях параметров краевого условия.

Работа выполнена при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН, проект № 18-1-1-5 и РФФИ, проект № 16-01-00608.

Литература

1. Vazquez J. L. The Porous Medium Equation: Mathematical Theory. – Oxford Press, 2007. – 648 p.
2. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений / А. А. Самарский, В. А. Галактионов, С. П. Курдюмов, А. П. Михайлов. – М. : Наука, 1987. – 470 с.
3. Сидоров А. Ф. Избранные труды. Математика. Механика. – М. : Физматлит, 2001. – 576 с.
4. Казаков А. Л., Лемперт А. А. Аналитическое и численное исследование одной краевой задачи нелинейной фильтрации с вырождением // Вычислительные технологии. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 57–69.
5. Spevak L. F., Kazakov A. L. Solving a Degenerate Nonlinear Parabolic Equation with a Specified Source Function by the Boundary Element Method // AIP Conf. Proc. – 2017. – 1915. – P. 040054.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Струнгарь Е.М.,
Третьяков М.П., Третьякова Т.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614000, Россия,
e-mail: wildemann@pstu.ru, cem_staroverov@mail.ru, cem.spaskova@mail.ru,
cem_tretyakov@mail.ru, cem.tretyakova@gmail.com*

Широкое применение слоистых углепластиков в изделиях аэрокосмической техники определяется их высокими эксплуатационными и удельными механическими характеристиками, опытное изучение которых при различных видах напряженно-деформированного состояния крайне необходимо для развития соответствующих моделей механики.

Работа посвящена изучению методических вопросов экспериментальных исследований закономерностей деформирования и разрушения трубчатых образцов углепластика в условиях сложного напряженного состояния. В испытаниях используются образцы с концентратором напряжений в виде кругового отверстия. Рассматриваются методические аспекты проведения испытаний при совместном растяжении с кручением на основе комплексного использования универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системы Instron 8852 и бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы анализа полей перемещений и деформаций Vic-3D, математический аппарат которой основан на методе корреляции цифровых изображений. Особое внимание уделено выбору способов подготовки захватных частей, внутреннего заполнения и закрепления образцов в захватах цангового типа, позволяющих проводить испытания при наличии осевой нагрузки и крутящего момента вплоть до полного разрушения.

В результате исследования получены опытные данные о процессах разрушения образцов с концентратором и о распределения неоднородных полей перемещений при пропорциональном растяжении с кручением. Проведен анализ процессов инициирования и распространения дефектных структур, формирования условий разрушения на основе изучения эволюции неоднородных полей перемещений в области концентратора.

Работа выполнена в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета при финансовой поддержке в рамках научных проектов РФФИ № 16-41-590360 p_a, 17-48-590158.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ СВОЙСТВ СЛОИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Вильдеман В.Э., Староверов О.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект 29, Пермь, 614000, Россия,
e-mail: wildemann@pstu.ru, sem_staroverov@mail.ru*

Проектирование конструкций из композиционных материалов неотъемлемо связано с созданием моделей, описывающих изменения свойств в процессе эксплуатации. Получение новых экспериментальных данных в условиях внешних комбинированных воздействий является актуальной задачей для механики деформирования твердых тел.

Работа посвящена вопросам экспериментальных исследований остаточных свойств слоисто-волоконистых стеклопластиковых композитов в условиях комбинированных циклических и статических воздействий.

В ходе исследования была реализована методика совместного использования испытательной электромеханической системы Instron E10000 и инфракрасной тепловизионной системы FLIR SC7700M на базе Центра экспериментальной механики ПНИПУ. Экспериментальная часть исследования состояла из реализации комбинированного циклического и квазистатического нагружения.

В результате экспериментального исследования построены диаграммы относительного изменения модуля упругости и снижения остаточного предела прочности композита. Отмечается, что введенные функции накопления повреждений и снижения предела прочности, описывающие изменение жесткостных и прочностных свойств композита с увеличением числа циклов предварительного усталостного воздействия, имеют близкие зависимости для данного материала. Проанализированы температурные поля в рабочей зоне образцов и выявлены характерные особенности распределения температур в зоне разрушения. Предложена новая форма оценки остаточной прочности исследуемого материала в виде диаграммы усталостной чувствительности. На диаграмме усталостной чувствительности отмечается стадийность изменения остаточной прочности в зависимости от степени предварительного циклирования. Для исследуемого материала выявлены участки начальной усталостной чувствительности, стабилизации и обострения усталостной чувствительности. При усталостном нагружении на стадии первых циклов происходят процессы разрушения самых непрочных связей, для описания поведения образцов на данной стадии введено понятие порога усталостной чувствительности.

Диаграмма усталостной чувствительности может быть использована для анализа остаточных прочностных ресурсов конструкций из композиционных материалов.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке в рамках научного проекта РФФИ № 16-41-590360.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ДВУХОСНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Третьяков М.П.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект 29, Пермь, 614000, Россия,
e-mail: wildemann@pstu.ru, cem_staroverov@mail.ru, cem_tretyakov@mail.ru*

Требования, предъявляемые к современным ответственным конструкциям, предполагают исследование характеристик сопротивления усталости в многоцикловой области. Вид напряженного состояния в конструкции может оказывать существенное влияние на долговечность функционирования, в отдельных случаях существенно снижая срок службы элементов. Таким образом, актуальным является анализ долговечности материалов в условиях, приближенных к условиям работы реальных конструкций, а именно – при многоосном циклическом нагружении.

Работа посвящена экспериментальному исследованию усталостного разрушения конструкционных сталей и сплавов при многоосном деформировании и нагружении, развитию моделей прогнозирования усталостной долговечности в условиях сложного напряженного состояния.

С целью исследования влияния постоянной касательной составляющей напряжений на усталостную долговечность при осевом циклическом нагружении и постоянной нормальной составляющей напряжений на усталостную долговечность при сдвиговом циклическом нагружении проведена серия испытаний корсетных образцов алюминиевого сплава Д16Т с использованием испытательного оборудования Центра экспериментальной механики ПНИ-ПУ. Результаты исследования представлены в виде диаграмм зависимости долговечности материала от величин действующих постоянных касательных и нормальных напряжений. Отмечается снижение долговечности материала при увеличении постоянных касательных и нормальных напряжений. С увеличением амплитуды циклической нагрузки влияние постоянной составляющей нагрузки снижается, однако характер снижения для каждого случая циклического нагружения разный.

Для случая циклического растяжения–сжатия при меньшей амплитуде снижение долговечности при увеличении постоянных касательных напряжений происходит более выражено. Так, при дополнительном действии постоянных касательных напряжений величиной $\tau = 0,8\tau_{0,3}$ количество циклов до разрушения при амплитуде нагружения составляющей $\sigma_a = 0,5\sigma_{0,2}$ снижается на 52,8 % по сравнению со случаем только циклического нагружения данной амплитуды. При амплитуде нагружения $\sigma_a = 0,61\sigma_{0,2}$ снижение происходит на 19,1 %. Аналогичные данные получены для случая постоянной дополнительной составляющей нормальных напряжений при циклическом кручении.

Проведена оценка влияния вида напряженно-деформированного состояния на остаточную прочность сплава Д16Т при растяжении–сжатии и кручении. Образцы подвергались предварительному циклическому воздействию с различной относительной степенью циклирования. Влияние вида НДС предварительного циклического воздействия на остаточную прочность материала, оценивалось при последующих квазистатических испытаниях на растяжение.

Были получены данные зависимости остаточных прочностных характеристик алюминиевого сплава Д16Т при различных видах НДС предварительного циклического воздействия. Отмечено, что изменение продолжительности предварительного циклического воздействия в диапазоне относительного числа циклов предварительного воздействия $n = 0.7...0.9N_{\max}$ существенно не сказывается на величине остаточного предела прочности.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке в рамках научных проектов РФФИ № 16-01-00239 А, 17-48-590096.

Литературы

1. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В. Э. Вильдеман, М. П. Третьяков, Т. В. Третьякова, Р. В. Бульбович, С. В. Словиков, А. В. Бабушкин, А. В. Ильиных, Д. С. Лобанов, А. В. Ипатова / под ред. В. Э. Вильдемана. – М. : Наука. Физматлит, 2012. – 204 с.
2. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований : учебное пособие / В. Э. Вильдеман, А. В. Бабушкин, М. П. Третьяков, А. В. Ильиных, Т. В. Третьякова, А. В. Ипатова, С. В. Словиков, Д. С. Лобанов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. – 165 с.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ 3D ПЕЧАТИ НА СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ

Логинов Ю.Н.¹, Степанов С.И.¹, Рышков Н.М.¹, Юдин А.В.², Третьяков Е.В.²

¹*Ural Federal University, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russia,*

²*Research Center JSC «RPA CNITMASH», 4 Sharikopodshipnikovskaya st., Moscow, 115088, Russia,
e-mail: j.n.loginov@urfu.ru*

В последние годы для изготовления имплантатов различного назначения из титана и его сплавов широкое применение находят аддитивные методы [1]. В качестве сырьевого материала используется порошок, обработка которого связана с такими понятиями как пористость. В свою очередь этот параметр в большой мере отвечает за физические и механические свойства получаемого продукта [2]. Принято выделять два типа пор: поры на микроуровне, появление которых сопутствует процессу получения изделий из порошка и зависит от технологических параметров получения компактных материалов. Второй тип – макропоры, которые могут создаваться искусственно для сознательного изменения физико-механических характеристик, например модуля упругости или прочностных свойств [3].

Цель работы – изучение влияния параметров 3D-печати на микроструктуру и свойства массивных изделий из титана. Для различных режимов послойного синтеза образцов, изготовленных методом селективного лазерного плавления на установке MeltMaster3D-550 производства АО «НПО «ЦНИИТМАШ», исследовалось влияние микроструктуры на механические свойства нелегированного титана марки ВТ1-0.

В опытах с применением метода селективного лазерного плавления удалось получить заготовки из титанового порошка при уровне достижения относительной плотности выше 99 %. Несмотря на наличие остаточной микропористости временное сопротивление материала достигает высоких значений и доходит до величины 646 МПа. Повышение предела текучести достигается за счет снижения скорости сканирования.

Литература

1. Failure modes in high strength and stiffness to weight scaffolds produced by Selective Laser Melting / Timothy B. Sercombe, Xiaoxue Xu, V.J. Challis, Richard Green, Sheng Yue, Ziyu Zhang, Peter D. Lee // *Materials and Design*. – 2015. – Vol. 67. – P. 501–508.
2. Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: Design, orientation and density / Sing Ying Choy, Chen-Nan Sun, Kah Fai Leong, Jun Wei // *Additive Manufacturing*. – 2017. – Vol. 16. – P. 213–224. – DOI: 10.1016/j.addma.2017.06.012.
3. Loginov Y. N., Stepanov S. I., Khanykova E. V. Effect of pore architecture of titanium implants on stress-strain state upon compression. *Solid State Phenomena*. – 2017. – Vol. 265 SSP. – P. 606–610. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.606.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Степанова Л.В.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
34, Московское шоссе, Самара, 443086, Россия,
e-mail: stepanovaiv@samsu.ru*

Детальное изучение процессов нелинейного деформирования и разрушения и нелинейных математических моделей, описывающих эти процессы, как правило, проводится с помощью вычислительного компьютерного имитационного эксперимента. Среди современных подходов моделирования роста трещины особыми преимуществами обладает метод молекулярной динамики, широко используемый в настоящее время [1–3].

Цель настоящего исследования – моделирование роста трещины в образцах из кристаллической меди и алюминия при смешанном деформировании в полном диапазоне смешанных форм нагружения от чистого нормального отрыва (тип I) до чистого поперечного сдвига (тип II).

Перспективным представляется использование пакета LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator).

В работе выполнено моделирование развития центральной трещины конечной длины в пластине в условиях смешанного нагружения в полном диапазоне смешанных форм деформирования от чистого нормального отрыва до чистого поперечного сдвига посредством метода молекулярной динамики в пакете LAMMPS. Получены и проанализированы траектории развития дефекта при различных формах смешанного нагружения. Рассмотрены эффекты воздействия температурного поля: моделирование с помощью метода молекулярной динамики проводилось при различных температурах от 0 до 150° К. Выполнено сопоставление результатов, полученных с помощью метода молекулярной динамики, с макроскопическими оценками направлений развития трещины при различных формах смешанного нагружения пластины с центральной трещиной в изотропном линейно упругом материале. Углы направления роста трещины были рассчитаны по трем критериям: критерий максимального тангенциального напряжения, критерий минимума плотности энергии деформаций и критерий максимальной окружной деформации. Углы, под которыми трещина развивается при действии различных систем нагружения, совпадают с результатами линейной механики разрушения в том случае, если пользоваться критериями роста трещины, основанными на критерии минимума плотности энергии деформаций и многопараметрическом представлении поля напряжений, базирующимся на разложении М. Уильямса механических полей. Предложена и применена методика вычисления параметра смешанности нагружения в случае применения метода молекулярной динамики. Приведены результаты численного расчета, выполненного в программном комплексе LAMMPS, проведенного с применением различных потенциалов взаимодействия (потенциал Леннард–Джонса, потенциал внедренного атома (EAM)).

На основе проведенного вычислительного моделирования смешанного нагружения пластины с центральной трещиной можно заключить, что моделирование роста трещины с помощью метода молекулярной динамики является мощным и действенным средством понимания процессов разрушения и деформирования твердых тел с дефектами. Перспективным направлением дальнейших исследований является создание многоскейлинговых моделей разрушения на различных масштабных уровнях, что даст возможность более глубокого понимания механизмов разрушения и реалистичного описания процесса роста трещины при сложных условиях нагружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-08-00571).

Литература

1. Степанова Л. В., Бронников С. А., Белова О. Н. Оценка направления роста трещины в условиях смешанного нагружения (нормальный отрыв и поперечный сдвиг): обобщенные критерии классической механики разрушения и атомистическое моделирование смешанного нагружения (метод молекулярной динамики) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – Т. 4. – С. 189–213.
2. Atomistic modeling for mechanism of crack cleavage extension on nano-scale / Y.-J. Gao, Q. Q. Deng, L. Ye. Huang, Z. C. Wen, Zhi-R. Luo // Computational Materials Science. – 2017. – Vol. 130. – P. 64–75.
3. Cui C. B., Lee G. H., Beom H. G. Mixed-mode fracture toughness evaluation of a copper single crystal using atomistic simulations // Computational Materials Science. – 2017. – Vol. 136. – P. 216–222.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОЛУДИСКА С ВЕРТИКАЛЬНЫМ И НАКЛОННЫМ НАДРЕЗОМ

Степанова Л.В.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
34, Московское шоссе, Самара, 443086,
e-mail: StepanovaLV2015@yandex.ru*

Определение направления роста трещины в условиях смешанного нагружения и критерии разрушения, позволяющие найти угол направления распространения трещины, являются одними из широко обсуждаемых проблем современной механики разрушения [1–4]. В настоящее время особенно актуальны вопросы теоретического, экспериментального и численного определения параметров механики разрушения для смешанного деформирования тел с надрезами и трещинами [1–3]. Одним из наиболее важных вопросов является моделирование чистого поперечного сдвига в экспериментальных условиях. Во многих работах предложены специальные образцы и специальные условия нагружения для воспроизведения чистого поперечного сдвига. В настоящее время предложен и широко используется ряд экспериментальных образцов для исследования смешанного нагружения, например в работах [2, 3] рассматривается полудиск с вертикальным и наклонным разрезами. В статье [3] обсуждается серия вычислительных экспериментов с данным типом образца, в котором варьируется угол наклона надреза. На основе проведенного компьютерного имитационного моделирования авторы показывают, что для определенного значения угла наклона разреза (49°) можно реализовать чистый поперечный сдвиг. Отметим, что чистый нормальный отрыв возникает при действии сосредоточенной силы на полукруглый диск с симметричным надрезом, ортогональным хорде полудиска. Изменение угла наклона разреза приводит к изменению типа нагружения и реализации смешанного деформирования. Тем не менее многие вопросы остаются открытыми: проведенное в рамках данной работы экспериментальное исследование полудиска с наклонным разрезом методом фотоупругости [4] показывает смешанное нагружение при данном значении угла наклона надреза, но не чистый поперечный сдвиг. Поэтому цель настоящей работы – конечно-элементное решение задач определения напряженно-деформированного состояния у вершины наклонного надреза в полудиске для различных значений угла наклона дефекта и вычисление параметров механики разрушения (коэффициентов интенсивности напряжений для нормального отрыва и поперечного сдвига) для нахождения вида смешанного нагружения. Вычисленные значения параметров разрушения (коэффициенты интенсивности напряжений и T-напряжения) показывают смешанное деформирование. Проведенное конечно-элементное исследование, реализованное в многофункциональном комплексе SIMULIA Abaqus, и последующее сравнение полученных результатов и наблюдений в рамках интерференционно-оптических методов механики деформируемого твердого тела (метод цифровой фотоупругости) подтверждают невозможность реализации чистого поперечного сдвига в данном типе образцов с наклонной трещиной. Анализ численных расчетов показывает, что действительно при угле наклона разреза, равном 49° , чистого поперечного сдвига не происходит. Для получения экспериментального образца, в котором реализуется чистый поперечный сдвиг, следует продолжить компьютерное имитационное моделирование для различных типов образцов.

Литература

1. Степанова Л. В., Бронников С. А., Белова О. Н. Оценка направления роста трещины в условиях смешанного нагружения (нормальный отрыв и поперечный сдвиг): обобщенные критерии классической механики разрушения и атомистическое моделирование смешанного нагружения (метод молекулярной динамики) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – Т. 4. – С. 189–213.

2. Fakhri M., Haghghat Kharrazi, Aliha M. R. M. Mixed-mode tensile – In plane shear fracture energy determination for hot mix asphalt mixtures under intermediate temperature conditions // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2018. – Vol. 192. – P. 98–113.
3. Mirsayar M. M., Razmi A., Berto F. Tangential strain-based criteria for mixed-mode I/II fracture toughness of cement concrete // *Fatigue Fracture Engineering Materials Structure*. – 2017. – P. 1–9.
4. Степанова Л. В., Долгих В. С. Цифровая обработка результатов оптоэлектронных измерений: метод фотоупругости и его применение для определения коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса поля напряжений на примере смешанного деформирования пластины с двумя коллинеарными трещинами // *Вестник Самарского технического университета. Серия: физико-математическая*. – 2017. – Т. 21. – № 3–4. – С. 717–735.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРОЦЕДУР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА SIMULIA ABAQUS

Степанова Л.В.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
34, Московское шоссе, Самара, 443086,
e-mail: StepanovaLV2015@yandex.ru

В настоящее время одной из актуальных задач современной механики деформируемого твердого тела и механики разрушения, в частности, является компьютерное имитационное моделирование процессов нелинейного деформирования и разрушения твердых тел под нагрузкой с учетом процессов накопления рассеянных повреждений. Под поврежденностью понимается относительное сокращение вследствие распределенных внутри образца микродефектов эффективной, несущей нагрузку, площади поперечного сечения образца [1]. Дegradацию материала можно трактовать как последовательное уменьшение эффективной площади, несущей приложенную нагрузку. Процесс накопления повреждений в твердых телах может быть описан с помощью введений скалярной или тензорной меры поврежденности [1–4].

В рамках связанной постановки задачи скалярный параметр поврежденности или компоненты тензора поврежденности входят в определяющие соотношения материала [1–4]. Решение краевых задач механики деформируемого твердого тела для элементов конструкций, находящихся в реальных эксплуатационных условиях, требует использования многофункциональных комплексов, таких как SIMULIA Abaqus. Однако среди моделей материалов, представленных в конечно-элементном пакете SIMULIA Abaqus, нет возможности прямого учета процесса накопления повреждений. Возможность моделирования сложных сред в пакете SIMULIA Abaqus реализуется с помощью обращения и применения пользовательских процедур, таких как UMAT и VUMAT.

В настоящей работе представлен опыт использования процедуры UMAT для описания накопления повреждений в образцах с концентраторами напряжений в материале с определяющими уравнениями, базирующимися на конституциональных уравнениях линейно-упругого изотропного материала и инкорпорирующими компоненты тензора поврежденности второго ранга [2]. Найдены распределения поврежденности у вершины трещины и проанализированы зоны активного накопления повреждений в условиях смешанного нагружения на примере ряда задач для тел с различными концентраторами напряжений и разрезами в полном диапазоне смешанных форм нагружения. Выполнена серия вычислительных экспериментов для диска с вертикальной наклонной трещиной (с различными углами наклона надреза к хорде диска) в материале с учетом процессов накопления повреждений.

Распределение компонент тензора поврежденности у вершины надреза в полукруглом диске представлены на рис. 1 и 2.

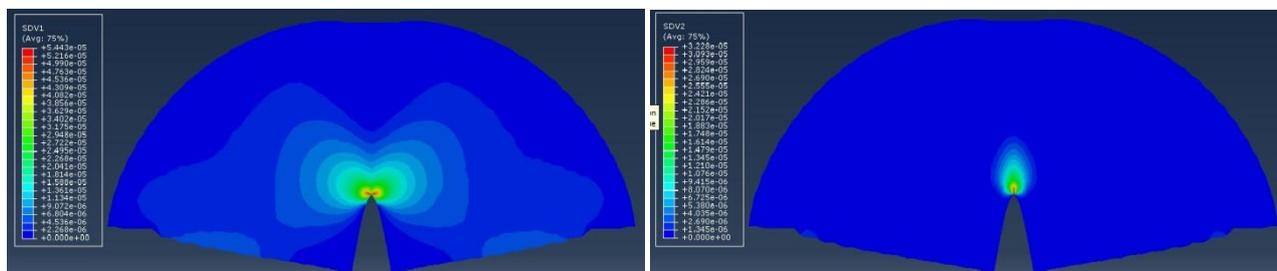


Рис. 1. Распределение компонент тензора поврежденности D_{11} и D_{22} у вершины надреза в полукруглом диске

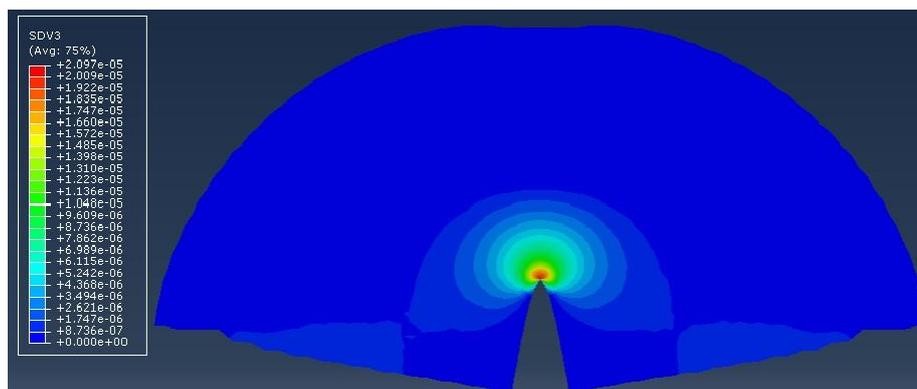


Рис. 2. Распределение компоненты тензора поврежденности D_{33} у вершины надреза в полукруглом диске

Автор благодарит Российский фонд фундаментальных исследований (проект 16-08-00571).

Литература

1. Астафьев В. И., Радаев Ю. Н., Степанова Л. В. Нелинейная механика разрушения. – Самара : Самарский университет, 2001. – 632 с.
2. Doquet V., Ben Ali N., Constantinescu A., Boutillon X. Fracture of a borosilicate glass under triaxial tension // Mechanics of materials. – 2013. – Vol. 57. – P. 15–29.
3. Modeling of the locally-functional properties of the material damaged by fields of defects / E. V. Lomakin, S. A. Lurie, P. A. Belov, L. N. Rabinskii // Doklady Physics. – 2017. – Vol. 62, no. 1. – P 46–49.
4. Stepanova L., Mironova E. Intermediate Asymptotic behavior of the stress and damage fields in the vicinity of the mixed-mode crack tip under creep regime// Ceur Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1904. – P. 141–150.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА, СФОРМИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

Соболева Н.Н.^{1,2}, Степченко А.К.², Макаров А.В.^{1,2,3}, Малыгина И.Ю.¹

¹Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия,
e-mail: natashasoboleva@list.ru

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия,

³Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Россия

Для модифицирования поверхности новых деталей, а также для восстановления изношенных и поврежденных поверхностей эффективно нанесение функциональных покрытий с использованием прогрессивного способа лазерной наплавки. Широко применяемые материалы для лазерной наплавки – сплавы на основе кобальта и никеля. Они находят широкое применение благодаря высокой прочности, твердости, отличной износостойкости, коррозионной стойкости и жаростойкости [1]. Износо- и коррозионностойкие сплавы на основе Со традиционно используются для нанесения на поверхности изделий из инструментальных сталей благодаря их значительной теплостойкости, более высокой, чем у сплавов на основе никеля [2].

Цель работы – изучение структуры, микромеханических и трибологических свойств покрытия на основе кобальта, сформированного газопорошковой лазерной наплавкой, и сравнение их с характеристиками никелевых покрытий, полученных тем же способом.

В качестве материала для покрытия был использован порошок сплава на основе кобальта гранулометрического состава 40–100 мкм – ПГ-10К-01 (1,45 % С; 22,6 % Cr; 31,8 % Ni, 4,1 % W, 1,2 % Fe; 1,1 % Si; 1,6 % В; остальное – Со).

В работе установлено структурно-фазовое состояние покрытия на основе кобальта с использованием сканирующей электронной микроскопии (с системой рентгеноспектрального микроанализа) и рентгеноструктурного анализа. Покрытие имеет практически постоянные уровни микротвердости и интенсивности абразивного изнашивания по всей толщине наплавленного слоя, что отражает относительно однородное распределение структурных составляющих по глубине покрытия. Установлено, что покрытие ПГ-10К-01 занимает промежуточное положение по твердости и износостойкости при испытании по корунду между никелевыми покрытиями разной степени легированности ПГ-СР2 и ПГ-10Н-01 [3, 4]. Однако при испытании по карбиду кремния у покрытия ПГ-10К-01 отмечается минимальная интенсивность изнашивания, более низкая даже по сравнению с покрытием ПГ-10Н-01, имеющим максимальную среднюю твердость из всех рассматриваемых наплавленных покрытий. Полученные результаты кинетического микроиндентирования соотнесены с развитием механизмов изнашивания рассматриваемого покрытия на основе кобальта.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме №АААА-А18-118020790147-4 и государственного задания ФАНО России по теме «Структура» №01201463331. Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Effect of graphite addition on the microstructure, hardness and abrasive wear behavior of plasma sprayed NiCrBSi coatings / Natarajan S., Anand E. E., Akhilesh K.S. et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2016. – Vol. 175. – P. 100–106.
2. Ahn D.-G. Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A review // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2013. – Vol. 14, no. 7. – P. 1271–1283. – DOI: 10.1007/s12541-013-0174-z.
3. Влияние микроструктуры и фазового состава на трибологические свойства NiCrBSi лазерных покрытий / Н. Н. Соболева, И. Ю. Малыгина, А. Л. Осинцева, Н. А. Поздеева // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 4 (3). – С. 869–873.
4. Макаров А. В., Соболева Н. Н. Формирование износостойких NiCrBSi покрытий лазерной наплавкой и комбинированными обработками // Перспективные материалы : учебное пособие / под ред. Д. Л. Мерсона. Том VII. – Тольятти : ТГУ, 2017. – 292 с. – Глава 5. – С. 167–238.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА С ПАДАЮЩЕЙ ВЕТВЬЮ ПО ДИАГРАММЕ ЧИСТОГО ИЗГИБА

Стружанов В.В., Коркин А.В.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия,
e-mail: stru@imach.uran.ru, alekorkin@list.ru*

В механике материалов особое место занимает проблема экспериментального определения свойств материалов на всех стадиях деформирования, включая и закритическую стадию. Трудность заключается в том, что в некоторый момент нагружения деформирование испытуемого образца теряет устойчивость, а именно либо существенно изменяется геометрия образца и соответственно нарушается однородность напряженно-деформированного состояния, которая является необходимым условием при определении свойств, либо происходит динамическое разрушение после выхода на закритическую стадию. Одним из возможных путей решения данной проблемы является проведение испытаний специальных конструктивных элементов с последующим пересчетом данных эксперимента на свойства материала. Конструктивный элемент и схема нагружения выбираются таким образом, чтобы в некоторой области элемент материала проходил все стадии деформирования и при этом сохранялась устойчивость самого элемента конструкции. Задачи определения количественных характеристик по результатам измерений их косвенных проявлений представляют собой обратные задачи, часто возникающие в физике, технике и других отраслях знаний. Как правило, они относятся к классу некорректных задач.

В качестве примера рассматривается конструктивный элемент в виде балки прямоугольного сечения и решается обратная задача определения свойств материала по результатам, полученным при чистом изгибе этой балки. Показано, что эта задача требует решения интегрального уравнения Вольтерры первого рода и, следовательно, является некорректной задачей. Для некорректных задач не выполняется третье условие корректности в смысле Адамара, а именно, сколь угодно малым возмущениям исходных данных соответствуют большие изменения решений. Поэтому после сведения исходной задачи к системе алгебраических уравнений с использованием метода трапеций вычисления определенных интегралов, при неточной правой части эта система дает характерное пилообразное решение. Регуляризация решения осуществляется методом подбора в специальной интерпретации. Модельный пример показывает, что изложенный алгоритм позволяет получить диаграмму деформирования материала при чистом изгибе с приемлемой для практики степенью точности.

АНАЛИЗ ПОЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СДВИГ 3D-ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Струнгарь Е.М., Янкин А.С., Бабушкин А.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Центр экспериментальной механики Комсомольский пр. 29, г. Пермь, 614013, Россия,
e-mail: cem.spaskova@mail.ru, yas.cem@yandex.ru, bav651@yandex.ru*

Многослойные углеродные ткани объемного плетения используются в качестве армирующего материала углепластиков, работающих в сложных и жестких условиях воздействия высокоскоростных аэродинамических потоков, вибрации при наличии высоких температур. Обзор технологических и структурных аспектов, а также современное состояние и перспективы применения трехмерных тканей в полимерных композитах приведены в работах [1, 2].

Работа посвящена экспериментальному исследованию сдвиговых характеристик 6 типов трехмерных композитов с различными схемами армирования. Испытания проводились в ЦКП Центр экспериментальной механики ПНИПУ на электромеханической системе Instron 5882 в соответствии с ASTM D 5379 [3] по методу Iosipescu. Деформации сдвига определялись с помощью трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D [4], в программном обеспечении которой использовался дополнительный модуль программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр», использование которого схоже с применением тензорезистора и заключается в отслеживании взаимного смещения между двумя точками поверхности образцов в соответствии с прикладываемым усилием. Два «виртуальных экстензометра» устанавливались под углом $\pm 45^\circ$ по отношению к оси нагружения. При этом его измерительная база составляла $1,5 \pm 1$ мм.

Применение видеосистемы позволяет получить более полную картину по сравнению с использованием тензорезисторов, учитывая особенности структуры материала. Для некоторых структур композитов наблюдались неоднородные поля деформаций в области сдвига. По полученным экспериментальным данным с видеосистемы исследована эволюция неоднородных полей продольных и поперечных деформаций на поверхности образцов. Рассматривались два способа измерения деформаций: с помощью инструмента видеосистемы «виртуальный экстензометр» и путем осреднения данных в прямоугольной области рабочей зоны образца. На основе полученных данных построены диаграммы деформирования, получены сдвиговые характеристики материалов и проведен сравнительный анализ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00763 в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Список литературы

1. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites / A. P. Mouritz, M. K. Bannister, P. J. Falzon, K. H. Leong // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 1999. – Vol. 30, no. 12. – P. 1445–1461.
2. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review // Textile Research Journal. – 2012. – Vol. 82, no. 7. – P. 725–743.
3. ASTM D 5379. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. – 13 p.
4. Sutton M. A., Orteu J.-J., Schreier. H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – Columbia, SC, US : University of South Carolina, 2009. – 364 p.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНОМ ГОРНОМ МАССИВЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Сулейманов Р.Н.¹, Чекалкин А.А.²

ПНИПУ, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, 614990, Россия,
e-mail: SuleymanovRN@gmail.com, A.A.Chekalkin@yandex.ru

Новые месторождения полезных ископаемых характеризуются сложными геологическими и гидрогеологическими условиями. Сооружение стволов в таких условиях возможно только с применением специальных способов.

Как показывает мировой опыт подземного строительства, одним из наиболее универсальных и надежных специальных способов является способ замораживания горных пород. В горнодобывающей практике с применением способа замораживания горных пород сооружаются 70–75 % всех вертикальных стволов в сложных условиях [1].

Практика строительства шахтных стволов способом замораживания показывает, что увеличение глубины стволов, сооружаемых с применением этого способа, ведет к значительному увеличению деформаций защитных ледопородных ограждений, к нарушению их сплошности и целостности замораживающих колонок.

Обоснование и разработка методов расчета ледопородных ограждений, образуемых при проходке шахтных стволов с применением искусственного замораживания, учитывающих различные сочетания горно-геологических и горнотехнологических факторов, позволяют повысить надежность и безопасность проектных решений, что является актуальной научной задачей [2].

Данное исследование направлено на изучение свойств геокомпозита с учетом свойств отдельных включений, прогнозирование напряженно-деформированного состояния, а также прочности и трещиностойкости [3], оценки эффективных свойств материала в зависимости от геометрии структуры; использование свойств компонентов для численного моделирования и корректировки свойств материала на стадии проектировки за счет изменения внутренней структуры композита.

В работе проведена разработка математических моделей для вычисления и анализа статистических характеристик, распространения температурных полей, математическое моделирование внутренней геометрии геокомпозита со случайной полидисперсной структурой; произведена оценка влияния геометрии, объемной доли и свойств включений на эффективные характеристики геокомпозита [4], моделирование процесса нестационарной теплопроводности геокомпозита с учетом фазовых переходов.

Создана полноразмерная численная модель нестационарной теплопроводности горного массива с использованием эффективных свойств горных пластов, характерного отличающихся по теплофизическим параметрам друг от друга, и реальной геометрии расположения замораживающих колонок по периметру и глубине шахтного ствола. Произведен анализ процесса образования ледопородного массива. Результаты, полученные при проектировании, сопоставимы с проектировочными, но благодаря численному моделированию есть возможность проследить за всем процессом образования ледопородного колодца и спрогнозировать дальнейшее поведение крепи при выработке.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 16-41-590375 p_a

Литература

1. Болотских Н. С., Бондаренко Н. А., Гальченко П. П. Строительство стволов шахт и рудников : справочник / под ред. О. С. Докукина и Н. С. Болотских. – М. : Недра, 1991. – 516 с. : ил.
2. Булычев Н. С., Комаров Д. С., Лукашин С. Б. Расчет необходимых параметров ледопородного ограждения // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2012. – Вып. 1, ч. 2. – С. 54–60.
3. Макарова Е. Ю., Соколкин Ю. В., Чекалкин А. А. Структурно-феноменологические модели прогнозирования упругих свойств высокопористых композитов // Вестн. Сам. Гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2010. – № 5 (21). – С. 276–279.
4. Расчет эффективной трещиностойкости для упругопластической слоистой среды / Р. Я. Газизов, С. Л. Калюлин, Р. Н. Сулейманов и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 37. – С. 154–171.

ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ В ГАЗОПРОВОДЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЕГО ПРОЧНОСТНУЮ НАДЕЖНОСТЬ

Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Андриенко Г.В.

*Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Россия,
e-mail: v_syzrantsev@mail.ru, kv.syzr@gmail.com*

Разработанные к настоящему времени методики оценки вероятности безотказной работы (отказа) трубопроводов основаны на описании случайных величин действующих и предельных напряжений нормальным законом распределения, параметры которого – средние значения и среднеквадратические отклонения – определяют путем статистической обработки массива возникающих в стенке трубы напряжений, рассчитываемых на основе зафиксированных в процессе эксплуатации трубопровода давлений и температуры, и данных предельных напряжений, полученных в результате испытаний образцов из материала трубы на прочность.

Цель работы – определение величины систематической ошибки при расчете вероятности отказа трубопровода, вносимой принятием для описания действующих напряжений нормального закона, а не фактического закона распределения напряжений, имеющего место при эксплуатации трубопровода.

Для восстановления неизвестной функции плотности распределения действующих напряжений использован математический аппарат непараметрической статистики – оценка Парзена–Розенблатта. На примере обработки конкретных данных определены функции плотности распределения действующих напряжений, рассчитаны вероятности отказа трубопровода. Показано, что результаты расчета вероятности отказа, основанные на учете фактических законов распределения действующих напряжений, могут значительно отличаться от рассчитанных из условия описания этих напряжений нормальным законом. Поскольку трубопроводы являются потенциально опасными объектами, рассмотренный в работе подход позволяет повысить достоверность результатов оценки их прочностной надежности в эксплуатации.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГАЗОПРОВОДА

Сызранцева К.В., Сызранцев В.Н.

Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Россия,
e-mail: kv.syzr@gmail.com, v.syzrantsev@mail.ru

Достоверность результатов определения безопасной эксплуатации газопроводов при переходе от прочностных расчетов к ресурсным, а затем – к расчетам на надежность резко возрастает. В докладе рассматривается газопровод, работающий при переменном во времени уровне давления (в общем случае случайном, с неизвестным законом распределении) и изменении (случайном разбросе относительно общего годового тренда) температуры окружающей среды. В результате напряжения ($\sigma_i, i = \overline{1, n}$) возникающие в стенках трубы законы, описанные в рамках теории параметрической статистики, не описываются, кроме этого и предельные напряжения материала трубы, используемые для оценки прочностной надежности газопровода также являются величинами случайными.

Цель работы – определение остаточного ресурса газопровода с заданной вероятностью разрушения (α), для достижения которой разработана расчетно-экспериментальная методика.

Условия, при которых реализуется методика.

1. Для материала трубы имеется кривая усталости, параметры и границы доверительных интервалов которой рассчитаны на основе кинетической теории механической усталости путем обработки результатов испытаний образцов до поломки.

2. Изготовлены датчики деформаций переменной чувствительности (ДДПЧ), в пределах рабочей части которых определена зависимость величины накопленных повреждений $D_x(x_g)$.

3. Нагружение газопровода в течение всего времени эксплуатации соответствует аддитивному случайному процессу.

4. Известно время (T_n) работы газопровода до наклейки ДДПЧ и время (T_g) его эксплуатации с ДДПЧ, по окончании которого на датчике зафиксирована величина (x_g) смещения границы первых «темных пятен», – реакции датчика на величину накопленных усталостных повреждений.

Результатом методики является прогнозирование остаточного ресурса (T_o , ч) газопровода с заданной вероятностью разрушения (α) вследствие усталости.

Основные этапы разработанной расчетно-экспериментальной методики.

Этап 1. По выборке ($\sigma_i, i = \overline{1, n}$) методами непараметрической статистики восстанавливают необходимую для дальнейших расчетов функцию плотности распределения напряжений $f_n(\sigma)$. Знание $f_n(\sigma)$ позволяет представить режим нагружения в виде конечного числа (m) ступеней блока ($\sigma_j, j = \overline{1, m}$), сумма относительной продолжительности которых ($t_j, j = \overline{1, m}$) равна единице.

Этап 2. При зафиксированной после работы трубопровода с ДДПЧ величине x_g по зависимости $D_x(x_g)$ устанавливается поврежденность D_x , полученная датчиком, определяется эквивалентное число циклов N_g деформирования газопровода за время T_g , которое позволяет рассчитать число циклов деформирования $N_{gj} = N_g \cdot t_j$ каждой ступени блока нагружения.

Этап 3. При известных x_g ; $\sigma_j; j = \overline{1, m}$ и $N_{gj} = N_g \cdot t_j$ определяют напряжения σ_s , эквивалентные блоку нагружения по повреждающему воздействию.

Этап 4. Рассчитывают коэффициент $K_s = N_g / T_g$, имеющий размерность цикл/ч, обеспечивающий приведение случайного режима нагружения газопровода к эквивалентному блочному, параметры которого идентифицированы до конкретных значений.

Этап 5. Имея σ и математическое описание кривой усталости, рассчитывают medianное значение числа циклов до поломки N_m и число циклов с заданной вероятностью разрушения N_m^α .

Этап 6. Остаточный ресурс газопровода T_o (ч) рассчитывают по зависимости:
$$T_o = N_m^\alpha / K_s - T_n - T_g.$$

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ К РАСЧЕТУ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ДЕФЕКТАМИ НА ПРИМЕРЕ ЛИСТОВЫХ РЕССОР

Кокуров А.М., Татусь Н.А.

*ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Россия, 119334, Москва, ул. Бардина, д. 4
e-mail: and-kokurov@yandex.ru, nikalet@mail.ru*

Листовая рессора – один из наглядных примеров применения волокнистых композитов в силовых конструкциях автомобиля. Стеклопластиковая рессора не редкость, существующие аналитические методы проектирования позволяют рассчитать ее габаритные размеры при удовлетворении условий по прочности и жесткости, но вызывает интерес поведение под нагрузкой рессоры с дефектами. В этом случае аналитический подход колоссально усложняется, и на помощь инженеру приходят современные методы расчета, позволяющие моделировать дефекты, их рост и весь процесс разрушения с учетом специфики волокнистых композитов.

Основное допущение аналитического расчета заключается в том, что структура рессоры не имеет дефектов или повреждений. Материал не изотропен, но однороден, можно учесть изменение модуля упругости по длине рессоры, которое возникает из-за разориентации волокон при профилировании. Конечно, аналитический расчет позволяет учесть макродефекты, например расслоение по всей длине рессоры, но это предельный случай, до которого рессора может и не «дойти», сломавшись, например в месте крепления моста или поворотного кулака.

В процессе эксплуатации силовых композитных элементов возникновение дефектов в виде расслоений и расщеплений есть основная причина их разрушения. В связи с этим возникает вопрос о необходимости проведения углубленного исследования прочности конструкции с учетом процессов возникновения и роста дефектов.

Авторами предпринята попытка моделирования поэтапного прогрессирующего разрушения композитного упругого элемента и определения его остаточной прочности. В качестве объекта исследования выбрана стеклопластиковая рессора, габаритные размеры которой получены аналитически по традиционным методикам.

Для моделирования прогрессирующего разрушения композитной конструкции применялся метод конечных элементов.

Цель – поэтапный анализ общей и местной прочности. Вначале проводился общий расчет модели, в результате было получено напряженно-деформированное состояние конструкции в целом, а также выделены характерные области, в которых возможно возникновения дефектов и повреждений. Затем проводили анализ полученных результатов, выбирали характерные механизмы разрушения – расслоение, расщепление, разрушение связующего и выкрашивание материала и др. Для выделенных областей сохраняли граничные условия (значения перемещений), необходимые для проведения последующих расчетов. На следующем этапе проводили расчет местной прочности рассматриваемого элемента конструкции. В частности, модель выбранного объекта перестраивали в зависимости от типа дефекта и проводили расчет на прочность при прогрессирующем увеличении дефекта. На основании результатов выполненных расчетов делали вывод об остаточной прочности исследуемой конструкции.

В результате проведенного численного исследования композитной рессоры автомобиля определены значения критических нагрузок, область возникновения дефекта и наиболее вероятный механизм разрушения, смоделировано прогрессирующее увеличение области повреждения и проведена оценка остаточной прочности.

Представленная методика и результаты исследования могут быть полезны при проектировании новых, а также оценки остаточной прочности и живучести уже существующих композитных элементов конструкции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-08-00372 А.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Татусь Н.А.¹, Полилов А.Н.¹, Тиан Х.²

¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
д. 4, Малый Харитоньевский переулок, Москва, 101990, Россия,
e-mail: nikalet@mail.ru,*

²*Государственная ведущая лаборатория инженерии производственных систем,
Сианьский университет Цзяотун, Китай, Xianning West Road, Xi'an, Shaanxi, 710049, P.R. China*

Рассматривается аналогия по изгибной податливости профилированных балок класса констэра (с постоянной площадью поперечного сечения) и разветвляющихся композитных структур, напоминающих крону дерева с постоянной суммой площадей сечений ветвей (правило Леонардо). В идеальном случае профилирование или ветвление обеспечивают рост податливости в три раза, то есть трехкратное повышение запасенной упругой энергии для фиксированных нагрузки и массы упругого элемента. Показано, что использование стеклопластика в подобных упругих элементах позволяет снизить их массу примерно в 20 раз по сравнению со стальным аналогом. Отмечены ограничения возможности использования линеаризованного уравнения изгиба для профилированных балок. Эффективное применение разветвленных композитных упругих элементов возможно в конструкциях космического базирования благодаря малому удельному весу и крайне низкой энергоемкости изготовления деталей из полимерных композитов, что допускает их производство непосредственно на орбите.

Ключевые слова: профилированная балка, равнопрочная балка, прочность, жесткость, упругая энергия, оптимальная форма, композитная плоская пружина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ МОРФОЛОГИИ СТРУКТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ

Тиунова А.Д., Ташкинов М.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский пр., Пермь, 614990, Россия,
e-mail: tiunova.anastasia@bk.ru, m.tashkinov@pstu.ru*

В последние годы активно развиваются экспериментальные и теоретические исследования, посвященные композитам с внедренными наночастицами. Перспективным направлением является модифицирование матриц композиционных материалов нанобъектами, в частности, углеродными нанотрубками. Например традиционно слабые прочностные свойства при поперечном растяжении и продольном сжатии волоконно-армированных композитных материалов могут быть улучшены путем замены стандартной полимерной матрицы на наномодифицированную. Также известно, что низкая плотность и высокая проводимость нанотрубок могут значительно улучшать проводящие свойства полимера без влияния на другие значимые характеристики.

На конечные свойства наномодифицированных композитов могут влиять многие факторы, в том числе тип и собственные свойства нанобъектов, их дисперсия в полимерной матрице, межфазные взаимодействия. Так, установлено, что параметры кластеризации нанотрубок могут оказывать ощутимое влияние на эффективные механические и проводящие свойства наномодифицированной полимерной матрицы.

В рамках данной работы изучена зависимость эффективных свойств полимерной матрицы от таких параметров, как объемная доля, форма и ориентация наномасштабных включений. Предложена оригинальная модель иерархического описания поведения полимерной матрицы с наномасштабными включениями, основанная на последовательном моделировании представительных объемов различного порядка малости. Считается, что нанотрубки распределены в матрице однородно, за исключением областей агломерации (кластеризации), внутри которых наблюдается повышенная концентрация нанотрубок. В моделях на масштабе второго порядка малости учитываются такие параметры, как соотношение размеров, форма, кривизна и объемная доля нанотрубок, а также размер представительного объема. На масштабе первого порядка малости рассматривается форма, объемная доля и эффективные свойства кластеров нанотрубок, толщина и свойства промежуточного слоя, эффективные свойства матрицы. Расчеты осуществлены методом конечных элементов при помощи средств пакетов MSC Marc и SIMULIA Abaqus.

Получены результаты вычислительных экспериментов по исследованию поведения наномодифицированной матрицы при различных условиях нагружения. При помощи предложенных иерархических подходов получены зависимости эффективных механических и физических свойств полимерной матрицы от параметров углеродных нанотрубок, выступающих в роли наполнителя.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-41-590259-р_а).

ДИСКЛИНАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ НЕУПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ

Останина Т.В.¹, Тельканов М.А.², Трусов П.В.³, Швейкин А.И.⁴

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29 Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Россия,*

e-mail: tv-ostanina@yandex.ru, michaelperm@gmail.com, tpv@matmod.pstu.ac.ru, alexsh59@bk.ru

Процессы получения поликристаллических металлов и сплавов с ультрамелкозернистой структурой в последние 15–20 лет все шире используются в различных отраслях машиностроения. Это обстоятельство связано с существенно улучшенными рабочими характеристиками изделий, приобретаемыми последними при обработке интенсивным пластическим деформированием (ИПД), ведущим к измельчению зеренной структуры материалов. Так, например, в [1] отмечается, что уменьшение зерен ниже некоторого порогового размера может приводить к кардинальному изменению свойств: микротвердость таких материалов может в 2–7 раз превышать микротвердость крупнозернистых аналогов, высокая прочность может сочетаться со значительной пластичностью. Возможность оптимального сочетания механических свойств в металлах и сплавах с наносубмикронной структурой открывает перспективы их применения в качестве новых конструкционных и функциональных материалов.

В настоящее время наиболее перспективными для описания процессов измельчения зеренной структуры при неупругих деформациях являются многоуровневые модели на базе физических теорий пластичности [2].

Цель работы – разработка многоуровневой модели для описания поведения металлов и сплавов, основные особенности которой (в контексте описания измельчения зеренной структуры) будут являться явный учет моментных факторов, определяющих развороты ячеек, за счет описания несовместности внутризеренного дислокационного скольжения и силовых полей дисклинаций, а также определение пространственного расположения границ ячеек.

В работе предложен подход к построению модели измельчения зеренной структуры на основе физического анализа дефектов, отвечающих за пластическую деформацию поликристалла. Рассматриваются структура, основные соотношения многоуровневой модели, базирующейся на введении внутренних переменных и использовании физических теорий упруговязкопластичности [2], в которой в качестве объекта исследования выступает представительный макрообъем поликристалла, состоящий из различно ориентированных элементов мезоуровня – кристаллитов – и границ кристаллитов. На микроуровне для плотностей дислокаций и дисклинаций формулируются эволюционные уравнения, включающие критерии зарождения и аннигиляции. На мезоуровне параметры измельчения (угол разворота и размер фрагмента) связываются с плотностями дислокаций и дисклинаций с помощью тензора кривизны – кручения [3].

Таким образом, с использованием дислокационно-дисклинационного анализа процесса деформирования на микро- и мезоуровнях построена многоуровневая математическая модель деформирования поликристаллов, позволяющая описывать процессы измельчения зеренной структуры при интенсивных неупругих деформациях.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Правительства Российской Федерации (грант РФФИ №17-19-01292).

Литература

1. Утяшев Ф. З. Деформационные методы получения наноструктурированных материалов и возможности их использования в авиадвигателестроении // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 10 (67). – С. 7–11.
2. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры / П. В. Трусов, А. И. Швейкин, Е. С. Нечаева, П. С. Волегов // *Физическая мезомеханика*. – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 33–56.
3. Clayton J. D., McDowell D. L., Bammann D. J. Modeling dislocations and disclinations with finite micropolar elastoplasticity // *Int. J. Plasticity*. – 2006. – Vol. 22. – P. 210–256. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2004.12.001.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛОТКАНИ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Темерова М.С.

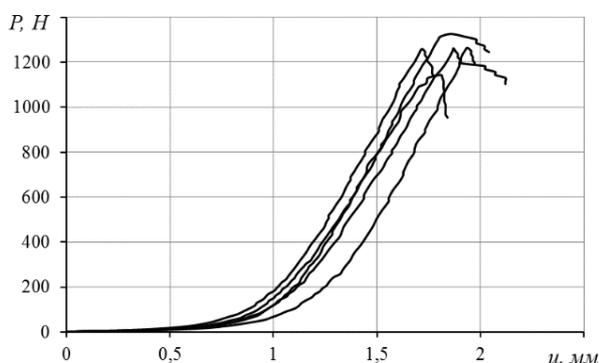
*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Центр экспериментальной механики, Комсомольский пр., 29, Пермь, Россия,
e-mail: cem.temerova@gmail.com*

Структуру тканого материала можно спроектировать таким образом, чтобы удовлетворить требованиям, связанным с различными особенностями изготовления композита или применения ткани как функциональной конструкции. В производстве композитов используются различные типы переплетения и виды тканей, они различаются по весу, толщине, типу, линейной плотности нити. Для моделирования таких материалов необходимы знания о механических свойствах исходных материалов, о поведении при деформировании.

Определение механических характеристик структурных составляющих тканого композита на каждом масштабном уровне (волокно–нить–ткань) является актуальной по ряду причин. Во-первых, широкое применение в промышленности тканых композиционных материалов требует решения задачи оптимизации состава и структуры тканого композита для конкретных условий эксплуатации, которую невозможно решить без данных о деформационных и прочностных характеристиках структурных составляющих. Во-вторых, на современном этапе развития компьютерной техники и технологии все чаще при численном моделировании конкретных узлов и соединений из тканых композиционных материалов применяется прямое многомасштабное моделирование, для реализации которого необходимы константы структурных составляющих начиная с волокна.

К нитям и волокнам сложно применять понятие «материал», так как нить создается не из материала, а одновременно с ним. Материал отдельно от текстиля не существует. Отсюда возникает сложность с использованием понятия «свойство материала». Поэтому важно исследовать механические свойства, на которые оказывают влияние свойства исходных волокон и нитей, волокнистый состав, структура и вид отделки.

Работа посвящена экспериментальному исследованию механических свойств нитей и тканых лент в исходном и пропитанном состоянии. Испытания на растяжение проводились в ЦКП «Центра экспериментальной механики» ПНИПУ на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5965 с использованием тисочных захватов. Расстояние между захватами составило 100 мм, измерительная база 40 мм, скорость подвижного захвата 100 мм/мин для пропитанных нитей и 10 мм/мин для пропитанных тканей. В захватные части образцов клеивались резиновые накладки для равномерного обжатия образцов.



a



б

Зависимости «нагрузка–перемещение» для ленты стеклоткани в исходном состоянии (*a*), пропитанном состоянии (*б*)

В ходе испытаний были получены напряжение, деформация, нагрузка, перемещение и модуль упругости для пропитанных углеродных, арамидных, стеклянных и базальтовых нитей. Для лент стеклоткани замечено различие в скорости накопления повреждений. Из зависимостей «нагрузка–перемещение» видно, что для пропитанных армирующих элементов разрушающая нагрузка и модуль на упругом участке увеличиваются. При испытаниях пропитанных лент меняется характер разрушения.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-41-590360 р_а) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

1. Тканые конструкционные композиты / Ф. Скардино, Дж. Хирл, С. Кавабата и др. / пер. с англ.; под ред. Т.-В. Чу, Ф. Ко. – М. : Мир, 1991. – 432 с., ил.
2. Экспериментальное исследование механических свойств современных хирургических рассасывающихся шовных материалов / А. Е. Федоров, В. А. Самарцев, В. А. Гаврилов, В. Э. Вильдеман, С. В. Словиков // Российский журнал биомеханики. – Т. 13, № 4 (46). – 2009. – С. 78–84.
3. Вильдеман В. Э., Темерова М. С. Исследование влияния эпоксидного связующего на прочностные характеристики тканых материалов // Материалы X Всероссийской научной конференции по механике деформируемого твердого тела, Самара, Россия, 18–22 сентября 2017. – Самара : СамГТУ, 2017. – С. 137–139.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СВОЙСТВА РЕЗИН НА ОСНОВЕ ЭПИХЛОРГИДРИНОВОГО КАУЧУКА.

Петрова Н.Н., Тимофеева Е.Н., Кузьмина Е.С.

*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Институт естественных наук, химическое отделение
Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского 48, 677000,
e-mail: ekaterinatimofeeva722@gmail.com*

В ходе эксплуатации техники в условиях Крайнего Севера часто наблюдается выход из строя техники из-за разрушения или частичной потери работоспособности резиновых деталей уплотнительного назначения. Например, анализ статистической информации по надежности автомобиля КАМАЗ в ходе эксплуатации на территории Республики Саха (Якутия) показал, что в среднем выход из строя эластомерных уплотнений составляет 20–30 % от общей доли ремонтных работ [1].

Для того чтобы эластомерные материалы надежно работали в экстремальных условиях, они должны обладать повышенным уровнем эксплуатационных характеристик [2]. Совокупность разных по природе свойств в одном материале можно получить в ходе создания композиционных полимерных материалов. Одним из перспективных направлений в этой области является разработка эластомерных композитов на основе углеродных нанотрубок (УНТ).

Эпихлоргидриновый каучук (ЭПХГ) обладает сочетанием таких свойств: как бензо-, термостойкость, низкая газопроницаемость и высокая морозостойкость.

Таким образом, цель работы – разработка резин уплотнительного назначения на основе эпихлоргидринового каучука, модифицированных углеродными нанотрубками (УНТ).

В работе были исследованы свойства резин на основе эпихлоргидринового каучука марки HYDRIN T6000, наполненных многостенными углеродными нанотрубками, продукта компании Research Center for Radiation Application, Китай.

Резиновые смеси готовили в смесительной камере пластикордера «Брабендер» при температуре 50 °С и частоте вращения вала 40 об./мин в течение 15 мин. Далее полученные смеси подвергали тщательной гомогенизации компонентов на вальцах. Затем смеси вулканизовали на гидравлическом прессе GT-7014-H10C в течение 50 минут при температуре 140 °С.

Исследование структуры УНТ проводили на растровом электронном микроскопе JSM-7800FX LV фирмы JEOL с энергодисперсионной приставкой элементного анализа X-max20 фирмы OXFORD.

Физико-механические свойства исследованы на разрывной машине Autograph UGS-J (Германия). Испытание проводили в соответствии с ГОСТ 270-84. Определение накопления остаточной деформации сжатия производили в соответствии с ГОСТ 9.029-74. Абразивостойкость модифицированных резин оценивали по методу определения сопротивления истиранию в соответствии с ГОСТ - 426-77. Определение степени набухания резин проводили в соответствии с ГОСТ 9.030-74.

Исследуемые нанотрубки представляют собой нановолокна диаметром от 20–47 нм, длиной от 8–30 мкм. В образцах УНТ китайского производства содержится до 10 % мас. кислорода, что позволяет предположить их равномерное распределение при введении в ЭПХГ. Проведенные исследования физико-механических свойств показали, что по мере увеличения содержания УНТ прочностные показатели исследованных резин имеют тенденцию к увеличению, однако при больших концентрациях УНТ значительно снижается относительное удлинение. Наиболее сильное влияние введение УНТ оказывает на износостойкость полученных резин, наблюдается улучшение на 30 %.

В результате проведенных исследований установлено, что оптимальное содержание УНТ китайского производства в резиновой смеси на основе ЭПХГ составляет 0,5–1,0 мас. ч. Для этих резин характерно наиболее равномерное распределение УНТ в эластомерной мат-

рице каучука, высокие износостойкость, прочностные характеристики и морозостойкость, т. е. можно предположить, что разработанные резины будут надежны при эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

Литература

1. Кузьмин В. Р., Ишков А. М. Прогнозирование хладостойкости конструкций и работоспособности техники на Севере. – М. : Машиностроение, 1996. – 304 с.
2. Петрова Н. Н., Курлянд С. К. Физико-химические аспекты создания масло- и морозостойких резин на основе смесей эластомеров // Полимерные композиты 98 : сб. трудов конференции. – Гомель, ИММС НАНБ, 1998. – С. 247–252.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОМ ИДЕАЛЬНОЙ ТОЧКИ СОСТАВА СЫРЬЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ЗАГОТОВКИ

Залазинский А.Г., Крючков Д.И., Титов В.Г.

*Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская,
г. Екатеринбург, 62004, Российская Федерация,
e-mail: tit@imach.uran.ru*

Титансодержащие материалы применяются во многих областях промышленного производства. Вместе с тем производство таких материалов отличается высокой энергоемкостью и значительным количеством трудно перерабатываемых отходов металлургического производства титана. Переработка отходов металлургического производства может быть произведена посредством порошковой металлургии, позволяющей существенно уменьшить материалоемкость продукции и объем механической обработки. При этом открываются перспективы для создания новых композиционных материалов, обладающих уникальными свойствами.

При создании композиционных материалов возникает задача выбора оптимального состава шихты из порошкообразного сырья. Поскольку компоненты шихты оказывают различное влияние на свойства и стоимость композиционных материалов, требуется за счет варьирования состава обеспечить определенный уровень характеристик получаемых изделий.

В качестве объекта исследования выступают брикеты из порошковых композиций, содержащих переработанные в порошок отходы промышленного производства титана. Известно несколько методов многокритериальной оптимизации. В работе приведены постановка и решение задачи по определению оптимального состава шихты для композитного материала из порошкообразного сырья методом идеальной точки.

Объект исследования – порошковый композит, состоящий из порошка, полученного из сплава ВТ-22 распылением плазмой, с добавками порошка титана ПТМ-1, полученного гидридно-кальциевым способом, порошка сплава никель-алюминий ПВ-Н70Ю30.

С целью выбора оптимального состава порошкового композита для производства изделий, работающих в условиях циклических силовых и температурных нагрузок, стойких к воздействию агрессивных сред, провели несколько серий отсеивающих экспериментов. В работе исследовали процесс уплотнения смеси порошка, полученного из сплава ВТ-22 распылением плазмой, с добавками порошка титана ПТМ-1, полученного гидридно-кальциевым способом, порошка сплава никель-алюминий ПВ-Н70Ю30. Порошок сплава ВТ-22 выбран для повышения прочностных свойств композиционного материала. Исследуемый порошок представлен фракцией менее 440 мкм, средний размер частиц – 156 мкм.

Образцы прессовали при давлениях 1000 МПа. Прессование брикетов проводили на гидравлическом прессе МС-500 в закрытой разборной пресс-форме. После прессования получены брикеты с относительной плотностью $\rho_{\text{отн}} = 0,71...0,85$. Качество брикетов оценивали визуально. В ряде случаев для неспеченных образцов с содержанием ВТ-22 60 % и выше наблюдалось осыпание нижней кромки. Спрессованные образцы спекались в вакууме 10^{-3} МПа в течение 2 ч при температуре 1200 °С, далее нагревались до температуры спекания 1 час. Использовалась вакуумная электропечь сопротивления камерного типа СНВЭ-9/18.

Прочность брикетов оценивали по результатам опытов на осевое сжатие на универсальной испытательной машине ZWICK ВТ1-FR050THW/A1K.

На основе анализа экспериментов даны рекомендации по выбору оптимального состава композиционного материала. Методом идеальной точки был определен следующий оптимальный состав шихты: 70 % порошка из сплава ВТ-22, 25 % порошка титана ПТМ-1, 5 % порошка сплава никель-алюминий ПВ-Н70Ю30. Этот состав отличается от составов, определенных другими методами. Различие оптимальных составов приводит к необходимости выбора достоверного метода. Метод идеальной точки самый простой метод с точки зрения использования по сравнению с методами обобщенного критерия, линейного программирования, Парето.

Выявлены следующие свойства метода идеальной точки: необходимость задания точки утопии, возможность получения нескольких идеальных точек. Необходимость задания точки утопии приводит к необходимости определения лучших значений критериев оптимизации. Возможность получения нескольких идеальных точек приводит к необходимости выбора одной точки из них.

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМУФТОВОЙ СВАРКЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ В ТЕРМОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ

Тихонов Р.С., Кондаков А.С., Старостин Н.П., Аммосова О.А.

*Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН,
Республика Саха (Якутия), 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1, Россия,
e-mail: roman_tikhon@mail.ru*

При электромuftовой сварке конец полиэтиленовой трубы вводят в электросварную муфту. На закладной нагреватель, встроенный в муфту, подается электрический ток, в результате которого спираль нагревает внутреннюю поверхность муфты и наружную поверхность трубы до вязкотекучего состояния. В муфте и трубе реализуется нестационарное неоднородное температурное поле, обуславливающее появление температурных напряжений, в том числе необходимое для сварки давление между трубами и муфтой на стадии формирования сварочного шва. В процессе сварки в зоне оплавления полиэтиленового материала происходят фазовые превращения в интервале температур с поглощением и выделением скрытой теплоты и изменением степени кристалличности материала. Задача определения нестационарного температурного поля в осесимметричной постановке с учетом теплоты фазового перехода и зависимости теплофизических свойств полиэтилена от доли жидкой фазы в интервале температур решается методом конечных элементов независимо от задачи определения напряженно-деформированного состояния (НДС). При этом доля жидкой фазы определяется по зависимости теплового потока, полученного с помощью дифференциального сканирующего калориметра.

Несмотря на то, что в твердом состоянии полиэтилен в большей степени проявляет вязкоупругие свойства, в данной работе задача определения НДС решается в осесимметричной термоупругой постановке с учетом пространственно-временного распределения температуры при предположении, что время релаксации материала достаточно велико по сравнению с продолжительностью процесса сварки. Приводятся результаты расчетов динамики температурного поля электромuftовой сварки полиэтиленовых труб для газопроводов диаметром 63 из ПЭ100 SDR 11 при различных температурах окружающего воздуха (ОВ). Сравнительным анализом температурных полей, полей напряжений и перемещений в процессе нагрева и охлаждения при сварке исследованы отличительные особенности НДС в сварном соединении в зависимости от температуры ОВ. Полученные результаты показывают, что при сварке в условиях низких температур в момент завершения нагрева давление между трубами и муфтой ниже, чем при сварке при допустимой температуре. Это обусловлено тем, что при низких температурах расширению подвергается меньший объем материала и получается меньше расплава. Таким образом, при сварке в условиях низких температур давление между трубами и муфтой недостаточно для получения качественного сварного соединения. В процессе нагрева наибольших значений достигают осевые напряжения по сравнению с радиальными и окружными. При этом свариваемые трубы и муфта претерпевают значительные деформации как в радиальном, так и осевом направлении. Деформации при допустимых и низких температурах ОВ практически не отличаются. Полученные результаты не противоречат современным физическим представлениям. Разработанный алгоритм решения термоупругой задачи в сварном соединении может служить основой для решения термомеханической задачи определения эволюции НДС с учетом степени кристалличности и вязкоупругих свойств полимерного материала.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Адамов А.А., Торопицина А.В.

ИМСС УрО РАН, д. 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Россия,

e-mail: toropitcina@avid.ru

Работа посвящена отработке методик численного конечно-элементного анализа элементов конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с использованием модуля вероятностного анализа программы ANSYS.

В большинстве отраслевых стандартов, методических рекомендаций, СНиПах и других руководящих документов по анализу прочности, долговечности, надежности элементов машин и конструкций объективно существующий статистический разброс нагружающих факторов, геометрических параметров деталей, свойств материалов по различным физическим, термомеханическим и прочностным характеристикам учитывается с помощью коэффициентов запаса.

Более адекватным, но существенно более трудоемким, методом оценки надежности элементов конструкций является прямой учет конкретных законов распределения для перечисленных случайных величин. Практическое использование модуля вероятностного анализа ANSYS требует следующих условий: задания конкретных законов распределения исходных параметров, моделируемых случайными величинами; формулирования эквивалентной меры критерия разрушения анизотропного ПКМ; многократного решения конкретной краевой задачи с различными векторами параметров, моделируемых случайными величинами.

Результатом решения краевой задачи в модуле вероятностного анализа являются оценки среднего значения критериальной величины в заранее заданной точке элемента конструкции и доверительного интервала для среднего с заданной вероятностью. Очень полезным результатом для оценки чувствительности элемента конструкции к вариации входных данных является диаграмма оценок их относительного вклада в доверительный интервал.

Для оценки вероятности разрушения рассматриваемого элемента конструкции принята аппроксимация закона распределения критериальной расчетной случайной величины нормальным законом распределения по оценкам ее среднего значения и границы доверительного интервала с известной доверительной вероятностью.

Оценка вероятности разрушения элемента конструкции выполняется стандартным способом сравнения закона распределения расчетной критериальной случайной величины с известным законом распределения критерия разрушения.

В работе для анализа элементов конструкций из углепластиков с различной ориентацией осей армирования однонаправленными монослоями толщиной 0,19–0,24 мм использованы в качестве базовых случайные величины толщины монослоя, характеристики его жесткости.

Для отработки методики вероятностного численного анализа элементов конструкций из ПКМ при неоднородном напряженно-деформированном состоянии использованы данные ранее проведенных достаточно представительных испытаний при трехточечном изгибе девяти партий образцов различных ПКМ (69–97 штук в партии). Испытания проведены согласно стандарту ASTM D7264 при комнатной температуре (23 ± 2) °С.

Получено удовлетворительное сравнение полученных результатов по оценке разрушения образцов при трехточечном изгибе для партий углепластиков, армированных однонаправленными монослоями. Для углепластиков с тканевыми монослоями необходимы более сложные критерии разрушения.

Представленная методика вероятностного анализа углепластиковых элементов конструкций, сформированных из монослоев однонаправленных волокон, необходима для анализа надежности элементов конструкций с различными концентраторами напряжений в виде отверстий и трещин различной природы.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 40X И ЭП517Ш ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Третьяков М.П., Вильдеман В.Э.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермь, Проспект Комсомольский, 29,
e-mail: cem_tretyakov@mail.ru, wildemann@pstu.ru*

С целью развития научно-обоснованных подходов к оценке и прогнозированию прочности, живучести и безопасности ответственных конструкций и технических объектов, основанных на совершенствовании представлений о разрушении материалов, важное значение имеет закритическая стадия деформирования. Необходимость развития соответствующих моделей механики создает потребность получения опытных данных о закономерностях закритического поведения конструкционных материалов при различных температурах. В настоящей работе экспериментальное изучение влияния повышенных температур на закономерности поведения сталей 40X и ЭП517Ш на закритической стадии, а также на их прочностные и деформационные характеристики, проведено на сплошных цилиндрических образцах при растяжении на универсальной сервогидравлической испытательной системе Instron 8801. Нагрев образцов осуществлялся в высокотемпературной печи Instron CP103202 с максимальной рабочей температурой 1100 °С. Температура контролировалась по термопаре, закрепленной непосредственно в рабочей части образца. Нагрузка и удлинение образца регистрировались по встроенным датчикам испытательной системы. Деформация в рабочей части образцов измерялась с использованием индукционного высокотемпературного экстензометра Epsilon 3648-010M с рабочей базой 10 мм и диапазоном измерения деформаций $\pm 2,5$ %.

Испытания проводились при температурах от 200 до 600 °С с шагом в 100 °С, а также при комнатной температуре. Время нагрева составляло от трех до пяти часов в зависимости от требуемой температуры, после чего производилась выдержка при температуре испытания не менее 60 мин. В ходе испытаний каждого образца регистрировали диаграммы деформирования, определяли основные механические характеристики (модуль Юнга E , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_B , остаточное удлинение после разрыва δ , относительное сужение после разрыва ψ), а также рассчитывали коэффициент реализации закритической стадии деформирования k_p .

С точки зрения развития представлений о закономерностях процессов деформирования и разрушения материалов на закритической стадии при различных температурах особое внимание уделяется анализу поверхностей изломов образцов. Проведена оценка влияния температуры на степень деформации материала, которая достигается к моменту разрушения образца и также оценивается по величинам остаточного удлинения и относительного поперечного сужения после разрыва. Полученные опытные данные демонстрируют, что увеличение температуры приводит к понижению таких характеристик, как модуль Юнга E , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_B , которые связаны с деформированием на упруго-пластической стадии деформирования. В то же время, наблюдается повышение остаточного удлинения после разрыва δ , относительного сужения после разрыва ψ и коэффициента реализации закритической стадии деформирования k_p , которые характеризуют пластическое поведение материалов и связаны с реализацией деформационных ресурсов. Полученные зависимости являются немонотонными в рассмотренном диапазоне температур.

В результате проведенных испытаний и анализа полученных опытных данных отмечается, что для рассмотренных конструкционных сталей повышение температуры в рассмотренном диапазоне будет приводить к снижению несущей способности конструкций, но может способствовать и увеличению деформационных ресурсов, что в свою очередь положительно сказывается на повышении живучести и безопасности и снижении катастрофичности разрушения изделий в аварийных ситуациях.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00069) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ, МИКРОПОР И МИКРОПРОСТРАНСТВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ РЕСТАВРАЦИЙ

Коротин С.В.¹, Третьяков М.П.², Третьякова Т.В.²

¹*Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера,
614000, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 26,*

²*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, г. Пермь, Проспект Комсомольский, д. 29,
e-mail: korotich@mail.ru, cem_tretyakov@mail.ru, cem.tretyakova@gmail.com*

В настоящее время светокомпозиционные материалы занимают одно из главных мест среди реставрационных стоматологических материалов, поскольку имеют высокий эстетический потенциал и достаточно длинный срок службы при гораздо меньших затратах по сравнению с керамическими материалами для однотипных реставраций передних и боковых зубов [1–3]. Кроме того, реставрации светокомпозиционными материалами позволяют выполнить малоинвазивное препарирование, а в некоторых случаях – совсем обходиться без предварительного удаления твердых тканей зуба, когда предполагается замена утраченных или недостающих тканей коронки зуба. Такой подход – это часть новой современной концепции под названием «биоэстетика», в которой предпочтение отдается аддитивным процедурам, таким как микроабразия, реконтурирование эмали зуба, прямая композитная реставрация или имплантаты для замены отсутствующих зубов. Эти многочисленные аддитивные процедуры и технологии, безусловно, заслуживают большего внимания в связи с тем, что они сравнительно более просты в реализации и имеют большую эффективность и предсказуемость [4–5].

Создание идеальных прямых реставраций всегда было сложной комплексной задачей, а часто – недостижимой целью из-за несовершенных оптических свойств композитов, а также из-за необходимости выполнения ряда клинических процедур для реализации метода. Попытка имитировать оттенки и техники послойного нанесения материала, разработанные для керамических реставраций, привели к появлению очень сложных для реализации методик, которые могли использовать только высококвалифицированные практикующие стоматологи. Концепция натуральных слоев является простым и эффективным методом создания высокоэстетических прямых реставраций. На сегодняшний день существует большое количество реставрационных светокомпозиционных материалов такого типа, которые удобны в использовании и дают стойкий предсказуемый результат. Однако техника послойного наложения композитного материала приводит в некоторых случаях к образованию микропористости и микропространств между слоями наносимого композита. Кроме того, структурные дефекты в виде пор встречаются и в толще исходной композитной массы.

Цель настоящей работы – создание исследовательской модели, включающей в себя последовательно нанесенные слои композита с включенными структурными дефектами, и оценка их влияния на прочностные характеристики композиционного материала. Проводится анализ структуры образцов материалов различных производителей (Prime-Dent, Artemis), изготовленных способом послойного нанесения с промежуточным отверждением с применением различных инструментов (сталь, силикон, кисть). Оценивается влияние методики нанесения слоев материала на конечную структуру образца и наличие дефектов, и, как следствие, на механические характеристики материала при сжатии и изгибе. Данное исследование представляется перспективным с учетом высокой распространенности использования стоматологических светокомпозиционных материалов и недостатка исследовательских опытных и расчетных данных о влиянии структурных дефектов на механические характеристики, прочность и долговечность материалов реставраций.

Литература

1. Hickel R., Manhart J. Longevity of restorations in posterior teeth and reasons for failure // J Adhes Dent. – 2001. – Vol. 3 (1). – P. 45–64
2. Buonocore Memorial Lecture. Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition / J. Manhart, H. Chen, G. Hamm, R. Hickel // Oper Dent. – 2004. – Vol. 29. – P. 481–508.
3. Macedo G., Raj V., Ritter A. V. Longevity of anterior composite restorations // J. Esthet. Restor. Dent. – 2006. – Vol. 18. – P. 310–311.
4. Heymann H. O. Conservative concept for achieving anterior esthetics // J. Calif. Dent. Assoc. – 1997. – No. 25. – P. 437–443.
5. Considerations about Enamel microabrasion after 18 years / R. H. Sundfeld, T. P. Croll, A. L. Briso, R. S. de Alexander, Neto D. Sundfeld // Am. J. Dent. – 2007. – No. 20. – P. 67–72.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРЕРЫВИСТОЙ ТЕКУЧЕСТИ НА ПРИМЕРЕ AL-MG СПЛАВА И УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Третьякова Т.В., Зубова Е.М.

Центр экспериментальной механики ПНИПУ, 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Россия,
e-mail: cem.tretyakova@gmail.com, cem.zubova@mail.ru

Прогнозирование поведения материалов в заданных эксплуатационных условиях, создание новых материалов и технологий требуют развитие представлений о закономерностях неупругого деформирования и разрушения металлических материалов в условиях проявления прерывистой текучести, установление и описание взаимосвязи неустойчивости и макролокализации пластической деформации в зависимости от вида сложного напряженного состояния и сложного нагружения. Эффекты прерывистой текучести снижают прочность, пластичность и качество поверхности материала. Процессы полосообразования и спонтанная макроскопическая локализация пластического течения приводит к разнотолщинности и, как следствие, к макроразрушению. Представляет интерес комплексное изучение механизмов и особенностей пластической деформации, явлений пространственной неоднородности и временной неустойчивости при различных видах НДС и сложных механических воздействиях.

Работа посвящена экспериментальному изучению влияния дополнительного вибрационного воздействия на кинетику инициирования и развития деформационных полос локализованного пластического течения (полос Чернова–Людерса и Портевена–Ле Шателье) на основе анализа эволюции деформационных и температурных полей, сигналов акустической эмиссии (АЭ) на примере конструкционных сталей и Al-Mg сплавов.

Реализованы механические испытания на одноосное растяжение и на одноосное растяжение с дополнительным вибрационным воздействием опытных образцов в форме двухсторонних лопаток, изготовленных из листового проката сплава АМг2м и стали 20. Кинематическое нагружение осуществлялось на сервогидравлической двухосевой (растяжение/сжатие, кручение) испытательной системе Instron 8850 (100 кН/ 1000 Н·м, 30 Гц) с постоянной скоростью 2.0 мм/мин при комнатной температуре. Дополнительное вибрационное воздействие реализовано с растягивающим усилием и частотой 4 Гц с синусоидальной формой волны. Регистрация полей деформаций и температур реализована бесконтактной трехмерной видеосистемой Vic-3D [1–3] и тепловизором FLIR SC7700M соответственно.

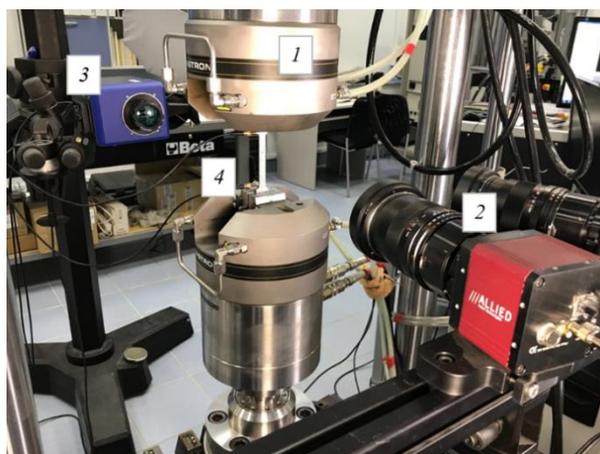


Рис. 1. Комплекс оборудования при проведении испытаний

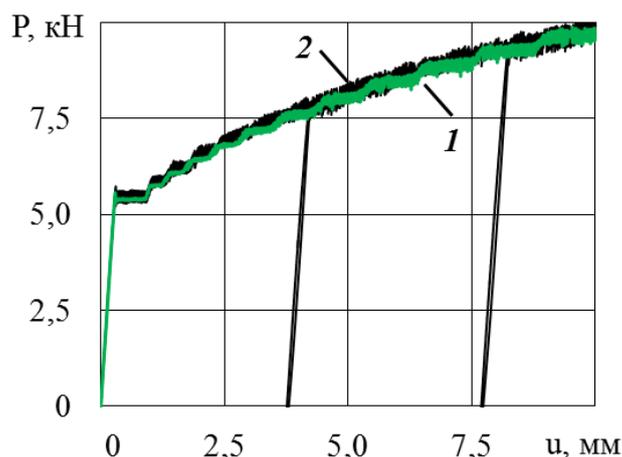


Рис. 2. Диаграммы деформирования сплава АМг2м при одноосном растяжении без (1) и с вибрационным воздействием (2)

Проведена оценка влияния вибрационного воздействия на кинетику формирования и распространения полос Чернова–Людерса на стадии запаздывания текучести в стали 20 и сплаве АМг2м, а также на пространственно-временную неоднородность пластического течения в условиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье (для АМг2м). Отмечено сохранение квазипериодического характера развития полей деформаций в процессе прерывистого деформирования, заключающегося в чередовании стадий возникновения локальных зон активного пластического течения и стадий макроскопического выравнивания уровня деформации по образцу [1, 2]. Исследование АЭ отклика в процессе нагружения показало, что при наличии дополнительных вибраций регистрируются сигналы АЭ с меньшей длительностью, снижается активность АЭ, уменьшаются значения энергетического параметра. Получены результаты обработки методик линейной и планарной локации сигналов АЭ.

Работа выполнена в ЦКП «Центр экспериментальной механики» при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научных проектов № 17-48-590158, № 18-31-00452.

Литература

1. Tretyakova T. V., Wildemann V. E. Study of spatial-time inhomogeneity of serrated plastic flow Al-Mg alloy: using DIC-technique // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2014. – Vol. 8, no. 27. – P. 83–97. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.27.10.
2. Ломакин Е. В., Третьякова Т. В., Вильдеман В. Э. Эффект квазипериодической гомогенизации пластических деформаций в процессе растяжения образцов алюминиево-магниевого сплава // *ДАН*. – 2015. – Т. 461, № 2. – С. 168–171. – DOI: 10.7868/S0869565215080095.
3. Закономерности развития неоднородных полей при закритическом деформировании стальных образцов в условиях растяжения / В. Э. Вильдеман, Е. В. Ломакин, Т. В. Третьякова, М. П. Третьяков // *Известия РАН. МТТ*. – 2016. – № 5. – С. 132–139.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НЕТКАНЫЕ МАТЕРИАЛЫ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИГИДРОКСИБУТИРАТА И КОМПЛЕКСА ЦИНКА С ТЕТРАФЕНИЛПОРФИРИНОМ^{1,2}

Тюбаева П.М.¹, Ольхов А.А.^{1,2}, Карпова С.Г.², Лобанов А.В.^{1,3}

¹Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова,
Москва, 117997, Россия, e-mail: polina-tyubaeva@yandex.ru,

²Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва, 119334, Россия,

³Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 4

В настоящее время большой практический интерес представляет разработка и исследование нетканых волокнистых материалов медицинского назначения на основе биополимеров. Одним из наиболее перспективных методов получения нетканых материалов с высокоразвитой поверхностью является электроформование (ЭФВ). В работе была рассмотрена надмолекулярная структура ультратонких волокон на основе полигидроксibuтирата (ПГБ) с комплексом цинка с тетрафенилпорфирином (ZnClTPP). Введение подобной модифицирующей добавки обуславливает использование волокнистых материалов в качестве средств медицинского назначения.

Цель проведенного исследования – установить особенности морфологии и структуры кристаллических и аморфных областей в волокнах в зависимости от концентрации добавки, вводимой в формовочный раствор биополимера, а также выявить ее изменения под влиянием различных факторов внешней среды.

В работе использовались нетканые материалы, полученные методом ЭФВ на одноканальной лабораторной установке с диаметром капилляра 0,1 мм (напряжение электрического тока 15 кВ, расстояние между электродами 18 см). Формование нетканых материалов осуществлялось из раствора ПГБ серии 16F, BIOMER (Германия), средневязкостная молекулярная масса которого составляла $2,06 \times 10^5$, в качестве модифицирующей добавки использовали комплекс ZnClTPP концентрацией 1, 3, 5 %.

Образцы нетканых материалов с различной плотностью были исследованы методом электронного парамагнитного резонанса на ЭПР спектрометре ЭПР-В (ИХФ РАН, Москва), кристалличность материалов исследовалась методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC 204 F1 фирмы Netzsch в среде аргона со скоростью нагрева 10 град./мин., также проводилось исследование укладки и взаимного расположения волокон в структуре материала на поляризационном микроскопе Микромед Полар-3.

Полученные следующие результаты исследования.

1. Установлено, что степень кристалличности напрямую зависит от концентрации модифицирующей добавки. Введение даже 1 % ZnClTPP ведет к более интенсивной кристаллизации в структуре волокон. ZnClTPP – инициирует формирование кристаллитов при отверждении раствора в процессе формования материала. При этом увеличение концентрации ZnClTPP не ведет к дальнейшему интенсивному росту степени кристалличности, предполагаются стерические затруднения, которые препятствуют формированию новых кристаллитов.

2. Анализ спектров ЭПР позволяет подтвердить зависимость между соотношением аморфных и кристаллических областей в материале от концентрации модифицирующей добавки. Изучение времен корреляции, которые увеличиваются с повышением концентрации ZnClTPP, показало, что происходит уплотнение аморфной фазы. Полученные данные согласуются с результатами ДСК.

3. Введение ZnClTPP оказывает значительное влияние на свойства материала. Оценивались три типа воздействия: отжиг при 140 °С, отжиг при 70 °С в воде, обработка озоном. Большой эффект при окислении озоном наблюдался у материала с большей степенью кристалличности, в них видно большие изменения молекулярной подвижности (следствие увеличения жесткости и выпрямления цепей). Следствием отжига в водной среде является заключение о росте сорбционной емкости материалов с более высокой кристалличностью, т. е. с ростом концентрации ZnClTPP возрастает выталкивание, области уплотняются и уменьшается количество молекул радикала. При температурном воздействии резкие изменения наблюдаются только в первые полчаса, далее структура мало меняется и материал оказывается достаточно устойчивым к воздействиям при нагреве.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РЭУ им. Г.В. Плеханова.

²Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования ИБХФ им. Эмануэля РАН.

НОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ, ОСНОВАННЫЕ НА АНАЛИЗЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ

Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А.

НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы», Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, д. 33, ул. Интернациональная, г. Тамбов, 392000, РФ, e-mail: nano@tsutmb.ru

Работа направлена на разработку новых методов контроля и дефектоскопии материалов и конструкций, основанных на анализе нестационарных тепловых полей. Основной задачей, решаемой в работе, является разработка оригинальных методов и аппаратуры для обнаружения дефектов и неоднородностей различных форм и масштабов в металлических и неметаллических изделиях, сварных, паяных и клееных соединениях, а также в металлических оболочках с наружным и внутренним защитным или теплоизолирующим покрытием. В работе дано описание ряда новых методов, средств контроля и дефектоскопии, реализованных в рамках единой технологической платформы, основанной на компьютерном анализе картин мультимасштабной динамической термографии. В зависимости от размеров инспектируемой области, а также характера, особенностей расположения, ориентации и размеров дефектов использованы различные источники энергии для зондирующего динамического нагрева контролируемого изделия: поток горячего воздуха, кратковременный нагрев электрическим током, сфокусированный лазерный пучок, точечный контакт с горячим телом. Нестационарная тепловая картина контролируемого участка поверхности инспектируемого изделия регистрировалась высокоразрешающим (в пространстве и времени) тепловизором и затем подвергалась анализу с помощью оригинальных модельных представлений и разработанного специализированного программного обеспечения.

Совокупность разработанных методов и программ компьютерной обработки ИК-изображения нестационарного поля распределения температуры на наружной поверхности изделия позволяет обнаруживать в нем и количественно характеризовать дефекты различного типа [1–3], размеров и расположения в изделии – трещины, расслои, отслоения и деградацию покрытий, дефекты сварки и клеевых соединений, депозиты транспортируемых веществ и др. не только вблизи наружной, но и внутренней поверхности оболочечной конструкции (сосудов, трубопроводов, реакторов, цистерн и т. п.), недоступной для прямого наблюдения. Латеральные размеры минимально обнаруживаемых дефектов в металлических изделиях и наружных покрытиях определяются угловым разрешением используемого тепловизора и могут составлять от долей мм в наименьшем измерении до многих десятков мм в наибольшем, а на внутренней стороне оболочек – сопоставимы с толщиной металлической стенки. Провоцирование их развития калиброванной локальной силовой нагрузкой [4–5] с помощью встроенного генератора силы дает возможность различать статичные дефекты от динамичных, т. е. склонных к росту, и тем самым оценивать степень их опасности для дальнейшей эксплуатации. Помимо дефектоскопических функций разработанные методики позволяют при необходимости определять и теплофизические характеристики материала, в частности коэффициент температуропроводности с точностью до нескольких процентов.

Разработка новой комбинированной методики и портативного прибора для оперативной диагностики дефектов, а также проведение экспериментальных исследований выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00181).

Разработка аналитических и численных моделей выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 17-48-680817).

Литература

1. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 19. С. 64–70.
2. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 24. С. 80–87.
3. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А. // Известия Вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 12. С. 175–177.
4. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Асланян Э.Г. и др. // ФТТ. 2017. Т. 59. № 9. С. 1778–1786.
5. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Асланян Э.Г. и др. // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 7–10.

АНАЛИЗ РАБОТЫ МАТЕРИАЛОВ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Каменских А.А., Устюгова Т.Н.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614000, Россия,
e-mail: anna_kamenskih@mail.ru*

В современной медицине в последнее время особое внимание уделяется оптимизации биомеханических конструкций и выбора материалов, из которых их изготавливают. Все работы в данной отрасли направлены на улучшение качества жизни населения и представляют собой широкомасштабные мультидисциплинарные исследования. Научные работы включают: экспериментальные исследования материалов биомеханических конструкций; выбор определяющих соотношений и математических моделей, описывающих поведение материалов; верификацию и апробацию математически моделей на тестовых задачах и модельных образцах; исследование поведения материалов биомеханических систем в реальных конструкциях разной геометрической конфигурации; выявление закономерностей их деформирования; составление рекомендаций по конструктивному оформлению биомеханических конструкций и др. В данной работе ранее описанные этапы исследования применены к конструкции зубных шин.

В рамках исследования в ФГБОУ ВО ПГНИУ (г. Пермь) была проведена серия натуральных экспериментов, направленная на определение свойств материалов современных протетических конструкций: этиленвинилацетата *Drufosoft* (Eva) и винилполисилоксана *Ufi Gel P* (А-силикон). В ходе исследования выявлено проявление упругопластических свойств основного материала протетических конструкций Eva, материал демпфирующих прослоек А-силикон работает в упругой зоне.

В рамках работы выполнен численный анализ поведения материала зубной шины Eva в конструкции без учета демпфирующего слоя из А-силикона. Исследование проводилось в рамках реализации модельной задачи о контактном взаимодействии пары зубов из верхнего и нижнего зубного ряда через протетическую конструкцию. Исследование включало численный анализ работы материала протетической конструкции в рамках упругости и упругопластичности с учетом и без учета трения по сопрягаемым поверхностям. При этом исследование включало анализ практической сходимости численного алгоритма решения биомеханической контактной задачи от степени дискретизации системы с оценкой качества выполнения контактных и естественных граничных условий. Выбрана оптимальная конечно-элементная сетка с градиентным уменьшением размера элемента к области контакта зубов с протетической конструкцией.

В рамках работы также выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния контактного биомеханического узла при контакте зубов с учетом и без учета протетической конструкции. Получено распределение напряжений и деформаций в паре зубов при контактном взаимодействии при разном уровне физиологической нагрузки. В результате анализа результатов серии численных экспериментов было установлено, что при контактном взаимодействии пары зубов через протетическую конструкцию наблюдается падение интенсивности напряжений в твердых тканях зубов. Максимальное падение интенсивности напряжения в зубной эмали наблюдается у зуба из верхнего зубного ряда и составляет около 60 %, для зуба из нижнего зубного ряда падение максимальной интенсивности напряжений меньше и составляет около 30 %. Сравнение интенсивности напряжений производилось с моделью контакта зубов без учета зубной шины при аналогичных уровнях физиологической нагрузки.

Исследовано влияние фрикционных свойств материалов протетической конструкции на параметры зоны контакта. Распределение контактного давления и контактного касательного напряжения очень похоже по характеру распределения по поверхности контакта. Установлено, что контактное касательное напряжение в 10 раз меньше контактного давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 17-48-590411 p_a.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ СО СФЕРИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Файзуллин И.З., Мусин И.Н., Вольфсон С.И., Болонина А.М., Файзуллин А.З.

*ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
68, Карла Маркса, г. Казань, 420015, Российская Федерация,
e-mail: ilnur-fz@mail.ru*

Стремительное развитие современных технологий создает необходимость разработки новых типов полимерных материалов с улучшенным комплексом свойств. В этой связи для улучшения технологических и эксплуатационных свойств в рецептуру полимерных композиционных материалов (ПКМ) вводят различные дисперсные наполнители [1–4]. Одним из актуальных и перспективных направлений полимерной отрасли является получение ПКМ на основе полимеров, наполненных стеклосферами. Выбор стеклосфер в качестве модификатора композиционных материалов обусловлен тем, что они являются высокотехнологичным универсальным наполнителем, который удобен в использовании, может придать изделиям уникальные свойства, что дает возможность использования их в различных сферах.

Возможность моделирования параметров стеклосфер обуславливает универсальность применения данного материала. Сферы использования их довольно обширны: в нефтегазодобывающей и химической промышленности, в современных строительных материалах, в аэрокосмической, судостроительной, автомобильной, радиоэлектронной, оборонной, медицинской промышленности.

Широкое распространение стеклосферы получили в полимерных композиционных материалах. Это связано с уменьшением количества связующего, необходимого для смачивания наполнителя, уменьшением усадки материала, снижением плотности и соответственно веса изделия, а также возможностью создания звуко- и теплоизолирующих материалов, свето- и теплоотражающих покрытий.

Стеглосферы подразделяют на две большие группы: полые и сплошные. Производители для удобства предлагают классифицировать стеклосферы по способу получения, размеру, плотности, пористости, сопротивлению раздавливанию, конструкции изделия – в зависимости от основных стеклообразующих компонентов.

Существует возможность модифицирования поверхности стеклосфер путем ее обработки с помощью аппретов. Это позволяет повысить монолитность наполненных композиций с помощью химического взаимодействия, регулировать прочность адгезионного взаимодействия стеклосфер с матрицей и улучшить сопротивление материала разрушению под влиянием атмосферных воздействий и влаги [5]. Модификация так же дает возможность совместности стеклосфер с абсолютным большинством полимеров.

Стеглосферы придают материалам устойчивость к коррозии, горению, внешним факторам среды [6, 7]. Малый размер определенных марок данного наполнителя способствует гладкому шлифованию поверхности, сопротивлению сколам и трещинам. Определенные марки полых стеклосфер устойчивы к высоким сдвиговым усилиям типовых процессов обработки полимерных композиций, поэтому их можно использовать в большинстве процессах литья под давлением и в экструзии. Они могут не только способствовать снижению массы, но и обеспечивают большую размерную стабильность полимерного изделия при производстве, а также более высокую производительность. Кроме того, стеклосферы способствуют повышению устойчивости к истиранию и уменьшению теплового линейного расширения.

Для получения высокотехнологичного изделия из ПКМ с заданным комплексом свойств необходим правильный подбор вида стеклосфер, дозировки и способа ввода. Для этого следует учитывать следующие факторы: тип микросфер (полые или сплошные), размер частиц, их истинную и насыпную плотность, устойчивость к разрушению под давлением, наличие и тип обработки поверхности. Также нужно принять к сведению рекомендации производителя по способу ввода и оптимальной дозировке стеклосфер. Для материалов, получае-

мых экструзионным методом, стоит особо тщательно выбирать стеклосферы таким образом, чтобы они выдержали высокие сдвиговые усилия и при этом степень их «выживаемости» была не менее 80 %.

Подводя итог можно сказать, что материалы со стеклосферами представляют собой новый класс высокотехнологичных полимерных композиционных материалов. Переработка композиций со стеклосферами методом экструзии позволяет расширить сферы применения этих наполнителей и открывает новые перспективы их использования.

Литература

1. Симонов-Емельянов И.Д. Структурообразование в полимерных композиционных материалах с полыми стеклянными микросферами / И.Д. Симонов-Емельянов, А.Н. Трофимов, Н.В. Апекумов, С.Б. Зубков // Пластические массы. – 2012. – № 11. – С. 6–10.
2. Fayzullin I.Z. The physicomaterial and rheological characteristics of wood–polymer composites based on thermally and mechanically modified filler / I.Z. Fayzullin, S.I. Volfson, I.N. Musin, A.Z. Fayzullin, A.N. Grachev, S.A. Pushkin // International Polymer Science and Technology, 2017, Vol. 44, No. 2, P. 39–43.
3. Fayzullin I.Z. Influence of the type of wood flour and nano-additives on structure and mechanical properties of wood polymer composites based on polypropylene / I.Z. Fayzullin, S.I. Volfson, I.N. Musin, A.Z. Fayzullin, A.A. Nikiforov // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2016) AIP Conf. Proc. 1785, 040098-1–040098-6; doi: 10.1063/1.4967155 Published by AIP Publishing.
4. Файзуллин И.З. Влияние нанонаполнителей на структуру древесно-полимерных композитов / И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, И.Н. Мусин, А.С. Гордеев // Вестник технологического университета – 2015. – Т. 18. – № 11. – С. 79–81.
5. Мийченко И.П. Наполнители для полимерных материалов: учебное пособие / И.П. Мийченко // Агентство по образованию «МАТИ» – Российский гос. технол. ун-т. – Москва, 2010 – 195 с.
6. Стеклянные микросферы [Электронный ресурс] – Электрон. текст. дан. – Режим доступа http://solutions.3mrussia.ru/wps/portal/3M/ru_RU/EU-EAMD/Home/OurProducts/GlassBubbles / (дата обращения: 10.11. 2017).
7. Сиротинкин, Н.В. Особенности горения композиционных полимерных материалов, наполненных полыми стеклосферами / Н.В. Сиротинкин, Е.А. Рюткянен, Ю.Н. Бельшина // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России – 2013 – №1. – С. 13–17.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Феклистова Е.В., Вильдеман В.Э.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Россия,
e-mail: cem.feklistova@mail.ru, wildemann@pstu.ru*

Учет закритической стадии деформирования [1] является характерной особенностью уточненного прочностного анализа. Она связана с процессом разрушения и трещинообразования. Знание основных закономерностей процесса разупрочнения, его математическое моделирование позволяют лучше спрогнозировать условия потери устойчивости конструкцией, выявить возможные параметры управления процессами разрушения и в значительной мере реализовать деформационный резерв материала.

Цель исследования – получение результатов в области моделирования процессов неупругого деформирования и разрушения тел с концентраторами различной геометрии. Для этого в настоящей работе проводится моделирование процессов разрушения тел с концентраторами напряжений, рассматриваются условия перехода дефектов от равновесного роста к лавинообразному разрушению.

На основе вычислительного эксперимента проводится нагружение пластин и исследуется развитие трещин. Для реализации данного процесса был составлен алгоритм поэтапного разрушения на языке программирования APDL в рамках прикладного пакета Ansys. Алгоритм описания процесса деформирования и разрушения на первом этапе включает в себя построение конечно-элементной модели исследуемой области, приложение граничных условий в перемещениях и расчет напряженно-деформированного состояния. После расчета напряженно-деформированного состояния происходит проверка выполнения условия прочности. При достижении или превышении элементом предела прочности его матрица жесткости умножается на величину, близкую к нулю, вследствие чего он исключается из дальнейшего расчета. Алгоритм повторяется до достижения некоторого предельного уровня перемещений либо до полного разрушения пластины. Результатом исследования является построение расчетных диаграмм деформирования, отражающих переход дефекта от равновесного роста к динамическому разрушению.

Для исследования развития зон разупрочнения на основе экспериментальных данных [2] рассматриваются различные способы задания расчетных диаграмм растяжения с учетом ниспадающего участка и изменением поперечного сечения образцов, которые наиболее точно бы описывали поведение материала при моделировании.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00069) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

1. Вильдеман В. Э., Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. –М. : Наука, 1998. – 288 с.
2. Радченко В. П., Горбунов С. В. Метод решения краевой упругопластической задачи о растяжении полосы с концентратором напряжений с учетом локальных областей пластического разупрочнения материала // Вест. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. –2014. – № 4 (37). – С. 98–110.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В ОБРАЗЦАХ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ

Филиппов А.В., Калашникова Т.А., Чумаевский А.В.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4 пр. Академический, г. Томск, 634055, Россия
e-mail: gelombang@ispms.tsc.ru, tch7av@gmail.com, avf@ispms.ru*

Аддитивная 3D печать является наиболее перспективным и бурно развивающимся направлением аддитивного производства пространственно-сложных и ответственных изделий для авиационной и ракетно-космической техники. Ранее технология электронно-лучевого плавления использовалась для сварки, нанесения покрытий на различные материалы, а также формирования износостойких структур в приповерхностном слое материалов. Для осуществления указанных процессов используется как вакуумная, так и вневакуумная технологии. К преимуществам технологии проволоочной электронно-лучевой 3D-печати можно отнести высокую производительность и плотность образцов, отсутствие окисления отдельных слоев материала за счет осуществления процесса в вакууме. В работе представлены результаты исследований структуры изделий из коррозионностойкой аустенитной стали 12X18H9T, полученных аддитивной 3D-печатью методом электронно-лучевого плавления в вакууме.

3D-печать образцов изделий методом аддитивного электронно-лучевого плавления осуществлялась на экспериментальной лабораторной установке в вакууме. Использовались следующие параметры печати: сила тока 33 мА, напряжение 33кВ, скорость сканирования (перемещения рабочих узлов 3D-принтера) 200 мм/мин, шаг сканирования 0,8 мм. Формирование объемного изделия осуществлялось по проволоочной технологии 3D-печати с применением проволоки диаметром 1 мм из коррозионностойкой стали аустенитного класса 12X18H9T.

Для выявления микроструктуры образцы последовательно механически шлифовали на абразивной бумаге, полировали на алмазной пасте зернистостью 1 мкм и суспензии коллоидного кварца зернистостью 60 нм. Травление осуществлялось электролитическим методом. К образцу подвели положительный заряд от источника постоянного тока. К стальным пластинам, погруженным в сосуд с электролитом, подвели отрицательный заряд. В качестве электролита использовали 10-й % раствор щавелевой кислоты $H_2C_2O_4$. Напряжение 6,1 В, сила тока ~0,05 А. Длительность травления составляла 30–40 сек. После травления осуществлялось фотографирование микроструктуры образцов в продольном и поперечном направлениях.

Как показали металлографические исследования, в области 3D-печати формируется дендритная столбчатая структура. На панорамном изображении поперечного сечения изделия отчетливо различима граница перехода изделие–подложка, а также отдельные слои изделия. Первый слой изделия, нанесенный в процессе 3D-печати, является наименьшим по толщине (450 мкм), что связано с частичным проплавлением материала подложки, в результате которого происходит сплавление материала проволоки с подложкой. Последующие слои имеют почти одинаковую толщину (800–900 мкм), что свидетельствует о стабильности условий 3D-печати. В этих слоях толщина слоя соответствует шагу сканирования по вертикальной оси 3D-печати.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ОСРЕДНЕНИЯ

Филиппов А.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт теоретической
и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН, Новосибирск,
e-mail: filippov@itam.nsc.ru*

Как известно, гетерогенный материал состоит из различных компонентов, таких как матрица и наполнитель, обладающих существенно различными механическими свойствами. Эффективность и работоспособность материала зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения.

Цель настоящей работы – определение механических свойств частиц наполнителя в зависимости от размера при различной концентрации. Используя общепринятые формулы для определения эффективных характеристик смеси в случае растяжения и сжатия, определяя коэффициенты для матрицы и смеси, возможно определить параметры Ламэ для наполнителя.

В экспериментальной части работы были подготовлены образцы на растяжение и сжатие из эпоксидной смолы DER-330 с добавлением нанопорошка диоксида кремния Аэросил А-380 (0–2 % мас.), а также нанопорошков диоксида кремния различной дисперсности. Определение упругих модулей на растяжение и сжатие осуществлялось на испытательной машине Zwick/Roell Allround Z005 при постоянных скорости нагружения или перемещения, чтобы прийти к одноосному напряженному или деформированному состоянию для случаев растяжения и сжатия соответственно. Сделаны выводы о применимости той или иной модели гомогенизации для оценки свойств наполнителя.

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ЖИВУЧЕСТИ УЗЛА СОЧЛЕНЕНИЯ СТЕРЖНЕВОГО КАРКАСА

Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф.

*Институт вычислительных технологий СО РАН (Красноярский филиал),
д. 53, пр. Мира, г. Красноярск, 660049, Россия,
e-mail: filippovajf@ict.nsc.ru*

Цель заключается в развитии информационно-вычислительных моделей анализа повреждений структурно-неоднородных технических объектов.

Рассматривается информационная модель накопления повреждений и живучести узла сочленения стержневого каркаса. Общая логическая схема интеграции вычислительных моделей прочности, живучести, безопасности в технологии информационной поддержки изделий включает следующие основные шаги.

1. На базе информации об изделии, имеющейся в интегрированной информационной среде управления жизненным циклом, с использованием библиотеки фрейм-описания неоднородностей строится информационная модель структурно-неоднородной конструкции.

2. Разрабатывается каузальная семантическая сеть – модель сценария многоуровневых процессов накопления повреждений.

3. Разрабатываются вычислительные модели оценки конструкционной прочности, живучести, безопасности, обеспечивающие количественные оценки процессов развития повреждений в связи с отдельными структурными неоднородностями. Использование этих моделей совместно с моделью сценария многоуровневых процессов накопления повреждений используется при проведении риск-анализа повреждений и обоснования решений, принимаемых в течение жизненного цикла.

4. Эти решения находят свое отражение в интегрированной информационной среде управления жизненным циклом.

В течение жизненного цикла в каркасе под влиянием комплексного нагружения (собственный вес, ветровые нагрузки, термодинамические воздействия, синусоидальная вибрация, акустический шум) накапливаются повреждения, описываемые сценарной моделью, представляемой семантической сетью каузального типа. Семантическая сеть представляет собой ориентированный граф, где вершины представляют собой понятия предметной области (в данном случае повреждения как состояния, ассоциированные с той или иной неоднородностью), а дуги – отношения между вершинами. В данном случае имеем дело с отношениями причинности. Таким образом, построенная семантическая сеть представляет собой сценарий развития повреждений, связанных с теми или иными неоднородностями, вплоть до предельного состояния конструкции. Многоуровневость процесса повреждений характеризуется количеством дуг, связывающих одновременно протекающие процессы развития повреждений. Сами же отношения причинности не обязательно имеют смысл детерминированной обусловленности, а могут отражать различную степень причинной обусловленности. Рассматриваемая информационная модель соответствует пониманию многоуровневого процесса накопления повреждений как системы, в которой существует взаимовлияние и взаимобусловленность развития отдельных повреждений.

Объект исследования – узел сочленения стержневого каркаса – представляет собой соединение композитных труб и фитингов посредством болтовых и клеевого соединений. Основным результатом является сценарная модель, включающая следующие процессы и события в их системном взаимодействии: смятие деталей преднатяженными болтами; ослабление затяжки болтов; разрушение клеевого слоя; нарушение плотности болтового соединения; разрушение обоймы; срез болтов; повреждение фитинга, трубы, обоймы.

Полученная модель используется в многовариантных исследованиях живучести узла сочленения стержневого каркаса крупногабаритной зеркальной антенны.

ПЕРСПЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Фортуна С.В., Колубаев Е.А., Елисеев А.А.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Россия,
e-mail: s.fortuna@ispms.tsc.ru*

Представленная работа направлена на разработку отечественной мультипучковой электронно-лучевой технологии аддитивного высокопроизводительного роботизированного производства крупноразмерных изделий из металлической проволоки (прутка).

Технология заключается в управляемом послойном нанесении металла из проволоки, расплавленной в вакууме при помощи мощного электронного пучка, до получения высокоточных заготовок, максимально приближенных по параметрам к конечным изделиям. Конкурентным преимуществом технологии является высокая скорость 3D-печати изделий (более 10 кг/ч), недостижимая для других технологий аддитивного производства металлических изделий. Технология позволяет получать крупноразмерные (до 5,0 м) металлические изделия с высокой плотностью и однородностью, в том числе из тугоплавких и жаропрочных сплавов. Дополнительными преимуществами являются возможность одновременного использования различных материалов для создания композитных конструкций и изготовление изделия в вакуумной камере, что позволяет избежать окисления металлических материалов.

К настоящему времени в рамках реализации проекта создана лабораторная установка для получения изделий аддитивным методом и отработки технологии. 3D-печать осуществляется с применением круговой интерполяции, за счет чего готовое изделие имеет форму тела вращения. В качестве типового примера реализована и изучена 3D-печать изделий из стали аустенитного класса 12X18H9T.

Для формирования высококачественного изделия методом аддитивного производства необходимо определить оптимальные значения комплекса основных технологических параметров (ускоряющее напряжение, ток пучка, скорость подачи проволоки, скорость перемещения изделия относительно электронного луча, смещение по координате Z, диаметр и частота развертки пучка), а также обеспечить их постоянное значение в процессе изготовления изделия.

Для оценки качества материала изделий, полученных при различных условиях 3D-печати (изменялась скорость подачи проволоки и перемещения формируемого изделия относительно электронного пучка), проводились структурные исследования методами оптической и конфокальной лазерной микроскопии, а так же механические испытания на сжатие.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что возможно формирование изделий в виде тел вращения со структурой материала изделий и механическими свойствами (условный предел текучести при сжатии), близкими к свойствам аналогичного материала в литом состоянии или превышающими таковые. Кроме того возможно управляемое формирование заданной микроструктуры с выраженными изотропными или анизотропными механическими свойствами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ТРУБОПРОВОДА

Хакимов А.Г.

*ИМех УФИЦ РАН, 71, пр. Октября, Уфа, 450054, Российская Федерация,
e-mail: hakimov@anrb.ru*

В гидроупругих системах может иметь место одновременное проявление упругих и гидродинамических неустойчивостей и их взаимодействие. Вопросам статического и динамического поведения продольно сжатого упругого элемента посвящены многочисленные исследования. Рассматривается взаимное влияние изгиба трубопровода, внутреннего и внешнего давления, действия сжимающей силы и течения жидкости с заданной плотностью и скоростью по трубопроводу. Трубопровод находится в поле ускорения, направленного по нормали к осевой линии. Принимается, что упругий трубопровод является тонкостенным, а идеальные жидкости внутри и вне трубопровода несжимаемы, поверхностное натяжение в них отсутствует. Тонкий упругий трубопровод закреплен на защемленных скользящих опорах, причем опоры не препятствуют течению жидкости внутри трубопровода вдоль его оси. Вне трубопровода находится покоящаяся жидкость. На опорах прогиб и угол поворота равны нулю. Используются допущения о несжимаемости срединной линии трубопровода, идеальности и несжимаемости жидкостей. Изучено статическое взаимодействие неустойчивостей в зависимости от сжимающей трубопровод силы, внутреннего и внешнего давления, скорости движения жидкости. Найдены области изменения этих параметров, когда происходят стабилизация и дестабилизация прямолинейной формы.

Продольная сжимающая сила, давления внутри и вне трубопровода и скорость течения жидкости изменяются независимо друг от друга. Интенсивность их возрастания от нуля считается такой, чтобы инерционные силы в системе были малы.

Полученные результаты позволяют анализировать устойчивость трубопроводов и тонкостенных трубок. Учет взаимодействия неустойчивостей трубопровода с жидкостью позволяет выявить важные свойства гидроупругой системы в приведенной постановке. В частных случаях получаются обобщения критерия Эйлера, аналогов критериев Гельмгольца, Релея и их парных взаимодействий для трубопровода. Изгибная жесткость трубопровода, растягивающие силы, внешнее гидростатическое давление стабилизируют, а сжимающие силы, внутреннее гидростатическое давление, движение жидкости с любой скоростью внутри трубопровода дестабилизируют его.

Чаще всего искривление трубопровода связывается со степенью обводненности, как основной причиной, где приведен статистический анализ местоположения 99 арочных выбросов, который позволил установить, что опасными с точки зрения потери проектного положения являются участки трубопровода, проложенные на первых 50 км от выхода из компрессорной станции (КС) (76 выбросов), далее от 50-го до 80-го км произошло 15 выбросов, на участке от 80-го км до следующей КС в полностью обводненных траншеях произошло 8 выбросов. Отметим также, что с удалением от КС уменьшается давление внутри трубопровода, что приводит к увеличению запаса устойчивости трубопровода по внутреннему давлению. Таким образом, результат работы хорошо согласуется с экспериментальными данными, которые указывают на необходимость рассмотрения механизмов искривления, связанных не только с обводненностью грунта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-41-020400 p_a, 18-01-00150).

Курганова И. Н. Теоретическое обоснование результатов натурного обследования газопроводов в непроектном положении // Надежность газопроводных конструкций – М. : ВНИИГАЗ, 1990. – С. 147–155.

СХОДИМОСТЬ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СЛАУ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ГЕТЕРОФАЗНОЙ СРЕДЫ

Халевицкий Ю.В., Коновалов А.В., Партин А.С., Смирнов А.С.

ИМАШ УрО РАН,

620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34, e-mail: me@dijkstra.ru

Металломатричные композиты представляют собой конгломерат упругих и упруго-вязкопластических тел. При моделировании процессов пластической деформации представительного объема композита методом конечных элементов необходимо многократно решать ряд систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для этого при решении задач с мелкой сеткой используются итерационные методы. Матрица каждой из систем обладает уникальными спектральными свойствами, от которых зависит сходимость метода.

Цель работы – исследование сходимости распространенных итерационных методов, основанных на подпространствах Крылова в задаче моделирования процесса пластической деформации гетерофазной среды. В качестве модельной задачи рассматривали однородное сжатие двухмерного микроскопического объема, содержащего представительный объем металломатричного композита на основе сплава В95 и 10 % частиц карбида кремния. Свойства материала матрицы и самого композита были получены экспериментально. На первом этапе решили модельную задачу до образования развитой пластической деформации в представительном объеме композита, при этом использовали прямой метод решения СЛАУ. Возникающая на последнем шаге матрица жесткости, а также правая часть, были выгружены во вторичную память компьютера. Эти данные использовали в вычислительных экспериментах, в которых исследовалась сходимость и время работы методов решения СЛАУ CGS, TFQMR, BiCGStab и GMRES. Измеряли время решения СЛАУ каждым из методов с критерием останова $r/r_0 = 10^{-6}$, где r и r_0 – невязка на текущем и первом шаге соответственно. Также установили зависимость нормы невязки от номера итерации. Вычислительные эксперименты провели на суперкомпьютере «Уран» ИММ УрО РАН с использованием пакета MATLAB.

Получили следующие значения времени решения СЛАУ: CGS – 43 с, TFQMR – 40 с, BiCGStab – 40 с, GMRES – 241 с. Методы CGS и BiCGStab показали непредсказуемый паттерн сходимости, выраженный в большом разбросе нормы невязки в зависимости от номера итерации. Это связано с тем, что матрица системы плохо обусловлена. В исследуемой задаче оценка числа обусловленности составляет 10^7 . При использовании методов TFQMR и GMRES невязка убывала практически монотонно. Метод GMRES показал хорошую сходимость, однако уступает по времени работы остальным методам в силу сложной реализации отдельных итераций.

Представленное исследование позволяет сделать вывод, что при моделировании деформирования гетерофазной упругопластической среды целесообразно использовать итерационный метод TFQMR. Несмотря на то, что метод BiCGStab показывает такое же время решения, норма невязки не убывает монотонно. Это означает, что метод может не достигнуть сходимости в подобной задаче.

Работа была выполнена по бюджетной теме № 0391-2016-0001 (з/р АААА-А18-118020790140-5) в части исследования сходимости итерационных методов решения СЛАУ в упругопластической задаче и при частичной финансовой поддержке гранта РНФ (Проект № 14-19-01358) в части разработки конечно-элементного программного комплекса для моделирования процессов деформации композитных материалов.

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТАВНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Хачай О.А., Хачай А.Ю., Хачай О.Ю.

*Институт геофизики УрО РАН имени Ю.П. Булашевича,
ул. Амундсена, 100, г. Екатеринбург, 620016, Россия,
e-mail: olgakhachay@yandex.ru,*

*Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.П. Ельцина,
ул. Мира, 16, г. Екатеринбург, 620002, Россия,
e-mail: khachay@yandex.ru*

Цель работы: новые материалы с многоуровневой иерархической структурой с заданными прочностными свойствами требуют регулярного изучения устойчивости их состояния. Для этого Разработан новый метод моделирования акустического мониторинга слоистой блоковой упругой среды с несколькими включениями различного физико-механического иерархического строения.

Метод исследования. Разработан итерационный процесс решения прямой задачи для случая распространения акустического поля через три иерархических включения l -, m -, s -рангов на основе использования 2D-интегро дифференциальных уравнений. Степень иерархичности включений определяется значениями их рангов, которые могут быть различными.

Результаты: Иерархические включения расположены в разных слоях друг над другом: верхнее – аномально пластичное, второе – аномально упругое, третье – аномально пластичное. Степень заполнения включениями каждого ранга для всех трех иерархических включений различная.

Выводы: Результаты моделирования могут быть использованы при проведении мониторинговых исследований устойчивости конструкций сложного иерархического строения при различных механических воздействиях.

Ключевые слова: составная иерархическая среда, акустическое поле, итерационный алгоритм, интегро-дифференциальные уравнения, прямая задача.

СИНТЕЗ АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СПЛАВОВ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Витязь П.А.¹, Сенють В.Т.¹, Хейфец М.Л.², Колмаков А.Г.³, Клименко С.А.⁴

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, 12, ул. Академическая, Минск, 220072, Беларусь, e-mail: vsepyut@tut.by,

²ГНПО «Центр» НАН Беларуси,

19, ул. Шаранговича, Минск, 220018, Беларусь, e-mail: mlk-z@mail.ru

³Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 49, Ленинский пр-т, Москва, 119334, Россия, e-mail: kolmakov@imet.ac.ru,

⁴Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2, ул. Автозаводская, Киев, 04074, Украина, e-mail: atmu@ism.kiev.ua

Синтез конструкционных материалов на основе легких сплавов предполагает максимальное использование технологических возможностей для управления структурой, а в результате – комплексом структурно-зависимых свойств и оптимизации эксплуатационных параметров качества сплавов [1]. Строение и свойства структур металлов и сплавов во времени определяются составом компонентов, а также температурой, давлением и другими факторами структурообразования. Происходящие при обработке процессы структурообразования описываются теорией термической обработки металлов, отражающей кинетику превращений при различных температурах и влияющие на ее ход факторы. Управление синтезом наноструктурированных композиционных материалов на основе сплавов алюминия наиболее доступно посредством легирования сплавов, а также их модифицирования наноструктурными добавками, имеющими различный физико-химический состав [2].

До настоящего времени всестороннее давление для управления структурообразованием в материалах активно не применялось. Применение обработки давлением для формирования структур в металлах и сплавах сдерживали технологические сложности управления процессом и недостаточная ясность, насколько эффективно может быть использовано давление для получения особых свойств материалов [2].

Цель работы – разработка технологических основ структурообразования в сплавах на основе алюминия при использовании режимов кристаллизации в условиях квазигидростатической термобарической обработки и последующей механической обработки давлением в сочетании с примесным модифицированием сплавов.

В результате было показано, что введение наноструктурных модификаторов на основе тугоплавких соединений в матрицу в количестве 1–5 мас. % тормозит рост зерен структурных составляющих сплава и приводит к увеличению твердости материала в 1,5–2 раза, снижению коэффициента трения в 3–5 раз по сравнению с базовым сплавом без добавок модификаторов. Сочетание метода термобарической обработки и дополнительной деформационной обработки (прокатки) приводит к существенным структурным изменениям в алюминиевом сплаве на макро-, мезо- и микроуровнях, что проявляется в их более высоких физико-механических и эксплуатационных характеристиках.

Исследования поддержаны грантами БРФФИ – РФФИ T14P-198 и T16P-176.

Литература

1. Effect of phase composition of nanostructured refractory modifier on structure and tribological behavior of AK12M2MgN alloy / P. A. Vityaz, A. I. Komarov, V. I. Komarova et al. // Journal of Friction and Wear. – 2013. – Vol. 34, no. 5. – P. 329–338.
2. Хейфец М. Л. Синергетический анализ структурообразования в металлах при термических, деформационных и комбинированных воздействиях // Доклады НАН Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 3. – С. 106–111.

ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В КОСОУГОЛЬНО АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТАХ В УСЛОВИЯХ СЖАТИЯ И РАСТЯЖЕНИЯ–СЖАТИЯ

Паймушин В.Н.^{1,2}, Холмогоров С.А.¹, Каюмов Р.А.^{1,3}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
ул. К. Маркса, д. 10, г. Казань, 420111, Россия,

²Казанский федеральный университет,
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия,

³Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, 420043, Россия,

e-mail: vpajmushin@mail.ru, hkazan@vandex.ru, kayumov@rambler.ru

Экспериментальным исследованиям нелинейного поведения косоугольно армированных волокнистых композитов посвящено множество работ. Такие исследования были проведены, в частности в работах [1–3] на образцах, изготовленных из углеленты ЭЛУР-П и связующего холодного отверждения ХТ-118 со схемой укладки $[\pm 45^\circ]$ в условиях циклического растяжения. Было показано, что диаграмма растяжения является сильно нелинейной, ветви нагружения и разгрузки не совпадают, образуя петлю гистерезиса. После нескольких циклов нагружения формируются остаточные деформации. Найденные секущие модули упругости на ветвях нагружения и разгрузки не совпадают на первых циклах нагружения, тогда как на тридцатом цикле наблюдалось их совпадение с большой степенью точности.

В развитие полученных ранее результатов для указанного выше композита проведены экспериментальные исследования нелинейного деформирования и процесса формирования остаточных деформаций в условиях циклического сжатия, а также в условиях симметричного цикла растяжения–сжатия. Для испытаний изготовлены образцы со схемой укладки $[\pm 45^\circ]$, общей длиной 95 мм, рабочей частью 20 мм, шириной 15 мм и толщиной 4,32 мм. Толщина и длина рабочей части образца были подобраны из условия, чтобы под действием сжимающей нагрузки рабочая часть образца не теряла устойчивость по изгибной форме. Образцы устанавливались в механические захваты двухстороннего действия, которые позволяют прикладывать к образцу как растягивающую, так и сжимающую нагрузки. Деформации измерялись с помощью контактного навесного экстензометра с базой измерения 10 мм.

При испытаниях на сжатие образцы нагружались кинематическим способом со скоростью деформаций $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и максимальным напряжением сжатия в цикле 45 МПа. Показано, что полученные результаты являются подобными результатам, полученным в условиях циклического растяжения. Однако значения секущих модулей упругости на этапах нагружения и разгрузки при сжатии меньше их значений, найденных при растяжении с одинаковым максимальным значением напряжений в цикле.

Испытания при симметричном цикле нагружения с максимальным абсолютным значением напряжения в цикле 45 МПа показали, что на каждом цикле формируется отрицательная остаточная деформация, приращение которой стремится к нулю к 50-му циклу нагружения.

На основе методики [3] и результатов, описанных выше экспериментов, проведен анализ механизмов формирования остаточных деформаций, выявлены их составляющие и предложены определяющие соотношения (математические модели) для их описания. Постулируется, что формирование отрицательных остаточных деформаций в условиях симметричных циклов растяжения–сжатия обусловлено несовпадением числовых значений параметров моделей, предложенных для описания введенных в рассмотрение составляющих общих деформаций в условиях циклического растяжения и сжатия.

Результаты исследований получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 9.5762.2017/ВУ, проект № 9.1395.2017/ПЧ.

Литература

1. Paimushin V. N., Kholmogorov S. A., Badriev I. B. Theoretical and experimental investigations of the formation mechanisms of residual deformations of fibrous layered structure composites // MATEC Web of Conferenes. – 2017. – Vol. 129, no. 02042. – 5 p. – DOI: [10.1051/matecconf/201712902042](https://doi.org/10.1051/matecconf/201712902042).
2. Паймушин В. Н., Холмогоров С. А., Каюмов Р. А. Экспериментальные исследования механизмов формирования остаточных деформаций волокнистых композитов слоистой структуры при циклическом нагружении // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2017. – Т. 159, кн. 4. – С. 473–492.
3. Определяющие соотношения в механике перекрестно армированных волокнистых композитов при кратковременном и длительном одноосном нагружении / В. Н. Паймушин, Р. А. Каюмов, С. А. Холмогоров, В. М. Шишкин // Изв. вузов. Математика. – 2018. – № 6. – С. 85–91.

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АЗОТА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Насыров В.Ф., Хуснимарданов Р.Н.

НПА «Технопарк АТ», ул. Трамвайная 5, к 1, г. Уфа, 450027,
e-mail: mr.khusnimardanov@mail.ru

Рассматривается технологический процесс ионной имплантации азота лопаток ротора компрессора газотурбинного двигателя. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния ионной имплантации на микротвердость и оценены толщины модифицированного слоя, а также результаты анализа остаточных напряжений и усталостных испытаний лопаток компрессора ротора ГТД из сплава ВТ6.

Ключевые слова: Газотурбинный двигатель, ротор компрессора, ионная имплантация азота, остаточные напряжения, надежность, ресурс, усталостные испытания лопаток, предел выносливости.

Введение

Разработка новых газотурбинных двигателей и освоение их в производстве тесно связаны с особенностями этих высоконагруженных, сложных в конструктивном и технологическом исполнении изделий.

Лопатки ротора компрессора являются ответственными элементами ГТД, испытывающими значительные осевые и радиальные нагрузки. Кроме того, профильная часть – перо – испытывает переменные напряжения от вибрационных нагрузок. Все это ведет к снижению долговечности ГТД.

На современном этапе развития машиностроения упрочнение путем изменения химического состава поверхностного слоя за счет применения ионно-плазменной технологии является эффективным направлением повышения надежности и ресурса лопаток газотурбинного двигателя.

Ионная имплантация поверхности, как способ поверхностной модификации, позволяет в приповерхностных слоях формировать твердые растворы высокой концентрации; наноразмерные фазы внедрения, улучшающие физико-механические характеристики имплантированных материалов.

Материалы и методика

Упрочнение лопаток компрессора методом ионной имплантации проводилось на установке «Виктория-2М» в НПА «Технопарк АТ». В работе были исследованы образцы из титанового сплава ВТ6 после ионной имплантации азотом дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/мм².

Исследование микротвердости образцов проводилось на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 20 г в соответствии с ГОСТ 9450. Замеры микротвердости проводились на косом шлифе с углом наклона $\alpha \approx 6^\circ$.

Остаточные напряжения определялись рентгеноструктурным методом на дифрактометрической установке «ДРОН-4».

Усталостные испытания лопаток проводились при напряжениях 40–60 кгс/мм², при комнатной температуре, в механических зажимах на вибрационном стенде V875.

Результаты и обсуждения

С целью определения влияния ионной имплантации азотом на эксплуатационные свойства лопаток ротора был проведен ряд исследований.

В результате исследования микротвердости на поверхности образцов после обработки методом ионной имплантации азотом установлено, что глубина упрочненного слоя составила 12 ± 1 мкм, степень упрочнения поверхности равняется 16 %

Основными показателями надежности лопаток ротора компрессора ГТД являются показатели остаточных напряжений и усталостных испытаний. В процессе изготовления лопатки компрессора подвергаются механической обработке, в результате чего в материале формируются остаточные внутренние напряжения.

Значения остаточных напряжений

Метод обработки	Остаточные напряжения σ , кгс/мм ²
Ионная имплантация азота	-40
Ионное азотирование	12,4

Ионная имплантация приводит к формированию на поверхности образцов сжимающих напряжений. В таблице для сравнения приведены результаты влияния ионного азотирования в плазме несамостоятельного дугового разряда, которые свидетельствуют о возникновении растягивающих напряжений на поверхности образцов, в результате чего могут быть причиной ускоренного зарождения и развития трещин.

Проведенные усталостные испытания лопаток компрессора показали, что упрочнение лопаток методом ионной имплантации азотом приводит к повышению предела выносливости до 15 %.

Заключение

Упрочнение методом ионной имплантации азотом лопаток из титанового сплава увеличивает прочностные свойства, а также обеспечивает их долговечность.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МИКРОАНАЛИЗА В ДИАГНОСТИКЕ МАТЕРИАЛА ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК ГТД В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Царева И.Н., Бердник О.Б., Кириков С.В., Кривина Л.А., Тарасенко Ю.П.

*Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФИЦ ИПФ РАН,
д. 85, ул. Белинского, Нижний Новгород, 603024, Россия, e-mail: npktribonika@yandex.ru*

Производство турбинных лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) является важным направлением современного машиностроения. Они относятся к деталям горячего тракта ГТД и работают в условиях одновременного воздействия высоких температур, эрозионного потока, силовых и вибрационных нагрузок. Надежность и безотказность лопаток при эксплуатации определяется во многом работоспособностью материала. В настоящее время существует традиционный подход в осуществлении контрольных процедур на разных стадиях производства, основанный на применении стандартов, разработанных в советское время. Он базируется на применении ГОСТов, ОСТов и ТУ, которые регламентируют технические требования к материалам, а также правила проведения контрольных процедур стандартными методами испытаний. Многие нормативные документы давно не пересматривались, а разработка технических условий на продукцию стала не государственным, а частным делом предприятий. Развитие современных методов исследований и неразрушающего контроля используется в машиностроении ограниченно и, как правило, факультативно. А развитие nanoиндустрии требует принципиально другого подхода, основанного на микроанализе материала.

Работа посвящена вопросам диагностики материала рабочих лопаток 1-й ступени газовой турбины энергетической установки ГТЭ-45-3 при их изготовлении. Проведены детальные исследования структуры и механических свойств жаропрочного никелевого сплава ЭП800-ВД на разных технологических стадиях изготовления: прутковая заготовка, штампованная заготовка, готовая лопатка. Анализ материала проведен в разных зонах (замковая и перовая части) заготовок и готовых лопаток как стандартными методами по ГОСТ и ТУ (испытания на разрыв и ударную вязкость, измерение твердости по Бринеллю), так и с применением оригинальных методик (неразрушающая оптическая металлография, электронная микроскопия, измерение твердости ультразвуковым методом, определение микротвердости и локального коэффициента пластичности, определение предела микропластичности и физического предела текучести методом релаксационных испытаний).

По результатам стандартных исследований структуры (балл зерна) и механических свойств (предел текучести, предел прочности, относительное удлинение, ударная вязкость, твердость по Бринеллю), материал лопаток на всех стадиях производства соответствует требованиям нормативной документации, но имеет пониженную длительную прочность. При этом методами оптической и электронной микроскопии (на стадиях прутковой и штампованной заготовок) обнаружены локальные неоднородности в микроструктуре, а именно: разнотернистость, карбидная строчечность и двойниковые границы зерен. Установлено повышение микротвердости (на 30 %) на выходной кромке перовой части лопатки, являющейся самой термонагруженной зоной при эксплуатации. В локальных микрообъемах материала установлено снижение микропластичности. Предложен критерий оценки работоспособности материала по коэффициенту пластичности ($\delta_H > 0,85$), определен допустимый интервал твердости без увеличения риска проявления эффекта микрохрупкости ($HV = 2,70-4,45$ ГПа).

Рекомендована новая методология диагностики материала на разных технологических стадиях изготовления и при выходном контроле деталей с применением современных неразрушающих методов, которая позволит повысить качество продукции и уменьшить количество отказов при эксплуатации.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОНИВЕЛИРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ НА ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ

Епин В.В., Цветков Р.В., Шестаков А.П.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
д. 1, ул. Королева, г. Пермь, 614013, Россия,
e-mail: flower@icmm.ru*

Испытание полномасштабных конструкций, состоящих из большого числа элементов, в предкритических и критических фазах ее деформирования, имеет важное значение для обеспечения безопасности сооружений на их основе. Для проведения таких испытаний требуется специализированный стенд, оснащенный оборудованием, которое способно осуществить и зафиксировать различные виды нагружения. Одной из нагрузок, моделирующей подвижку грунтов, является приложение неравномерных вертикальных перемещений к элементам исследуемой конструкции с помощью домкратов. Таким образом, измерение поля вертикальных перемещений при проведении экспериментов представляет интерес как для контроля процесса нагружения конструкции, так и для оценки его деформационной реакции.

Одним из способов измерения полей вертикальных перемещений является метод гидростатического нивелирования, на основе которого можно создавать системы с необходимым количеством датчиков. Такая система состоит из сообщающихся измерительных сосудов, наполненных жидкостью. Уровень жидкости в этих сосудах под действием силы тяжести устанавливается в одной плоскости, относительно которой датчики и производят измерения вертикальных перемещений. При проведении испытаний в результате приложения различных нагрузок к конструкции и нивелиру в нем могут возникать переходные процессы, которые окажут влияние на точность измерений. Для разработки программы испытаний нужно оценить характерные времена этих процессов. Кроме того при оптимизации параметров измерительной системы (диаметры трубок и измерительных сосудов, виды жидкостей и т. д.) можно улучшить ее время реакции на изменившуюся нагрузку.

В работе предложена математическая модель гидронивелира с произвольным количеством измерительных сосудов. В качестве примера на основе численных экспериментов с моделью произведены оценки переходных процессов в нивелире, содержащем 12 датчиков и адаптированным для испытательного стенда. Анализ этих результатов позволяет оценить характерные времена, за которые затухают колебания в результате возмущения на одном из датчиков, а также позволяет осуществить выбор параметров нивелира для повышения его быстродействия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 14-29-00172).

О ПРИРОДЕ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ Ст20 ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСОКИХ ВНУТРЕННИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Неганов Д.А.¹, Ценев Н.К.²

¹ООО «НИИ Транснефть», e-mail: nktsenev@yandex.ru

²НТЦ ООО «НИИ Транснефть», д. 144/3, Проспект Октября, г. Уфа, 450055

В работе на примере стали Ст20 феррито-перлитного класса, широко применяемой в изготовлении различных соединительных деталей трубопроводного транспорта, исследовано влияние остаточных внутренних напряжений на развитие процессов разрушения. С целью получения образцов с различным уровнем остаточных напряжений заготовки стали Ст20 в виде квадратных прутков длиной 500 мм подвергали различной степени прокатки на 4-валцовом прокатном стане. В результате деформационно-термической обработки были получены образцы с близкой микроструктурой, но различным уровнем внутренних остаточных напряжений и механических свойств.

Макронапряжения первого рода определяли методом рентгеновской тензометрии, изложенной в работе. Съёмки производили на дифрактометре Rigaku Ultima IV, оборудованного автоматической приставкой для определения остаточных напряжений.

Определение величины ударной вязкости (KCV) стали Ст20 с различным уровнем остаточных напряжений проводили на маятниковом копре РН-300 при комнатной температуре, а деформацию на растяжение проводили на универсальной испытательной машине LFM-400.

Фрактографические исследования выполняли на сканирующем электронном микроскопе Tescan серии Mira3.

Результаты влияния макронапряжений первого рода на механические свойства представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Влияние уровня внутренних остаточных напряжений на механические свойства стали Ст20

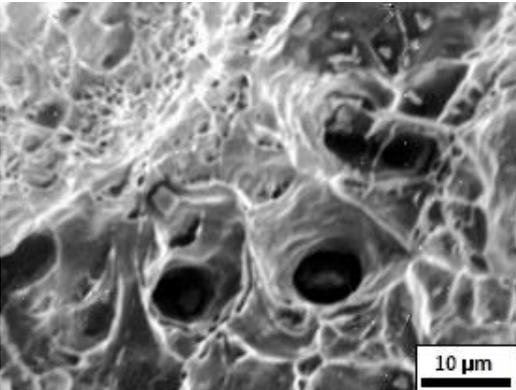
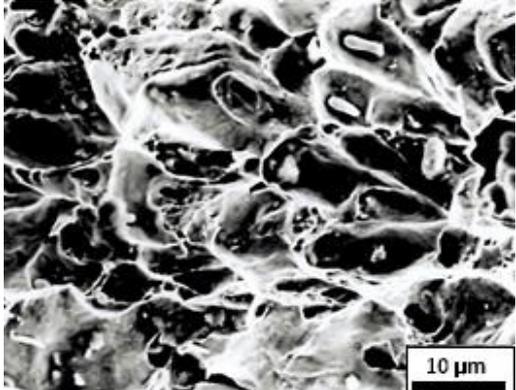
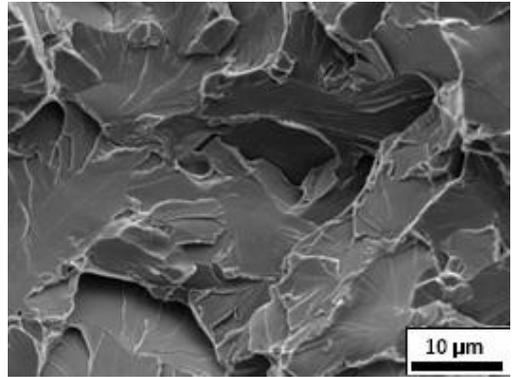
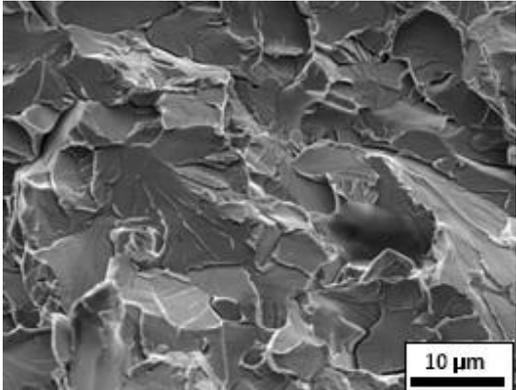
Уровень макронапряжений, МПа	Условный предел текучести, σ_{02} , МПа	Временное сопротивление, σ_B , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Ударная вязкость KCV, Дж/см ²
70	245	425	23	48,0
176	378	560	21	40,0
412	417	603	15	11,0
515	613	704	9	6,0

Видно, что с увеличением уровня внутренних остаточных напряжений предел текучести и временное сопротивление существенно увеличиваются. В то же время относительное удлинение и значения ударной вязкости существенно снижаются.

Фрактографическими исследованиями установлено, что микрорельеф поверхности разрушения при испытаниях на ударную вязкость при комнатной температуре также существенным образом зависит от уровня остаточных напряжений (табл. 2). Так, при остаточных напряжениях 70 МПа и 176 МПа наблюдается характерный вязкий излом, а при высоких значениях внутренних остаточных напряжениях наблюдается хрупкое разрушение

В работе объясняется природа влияния внутренних остаточных напряжений на механические свойства и характер разрушения стали с дислокационных и дисклинационных позиций.

Таблица 2 – Влияние уровня внутренних остаточных напряжений на микрорельеф поверхности разрушения стали Ст20 после испытаний на ударную вязкость

Уровень внутренних остаточных напряжений, МПа	Микрорельеф поверхности разрушения
70	
176	
412	
515	

РОЛЬ ДЕФЕКТОВ В ФОРМИРОВАНИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ AlOOH ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Цуканов А.А., Псахье С.Г.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, Академический просп., Томск, 634055, Россия,
e-mail: a.a.tsukanov@yandex.ru*

В связи с активным развитием нанотехнологий их результаты находят применение в растущем количестве фундаментальных и прикладных задач. В частности, важное место в развитии современной биомедицины занимает разработка и использование гибридных биоактивных наноматериалов с иерархической структурой. Примером является комбинирование в одном процессе терапии и диагностики с использованием многофункциональных иерархических наночастиц на основе низкоразмерных гидроксидов металлов с биоактивными органическими молекулами и ферромагнитным ядром [1]. Формирование и стабильность гибридного наноматериала с иерархической структурой является одним из ключевых вопросов при разработке многофункциональных биоактивных наноагентов [2].

Уникальные физические и химические свойства низкоразмерных наноструктур оксигидроксида алюминия γ -AlOOH делают его перспективной основой для создания биоактивных наноагентов с иерархической структурой [3]. Взаимодействие органических молекул и ионов биологической среды с нанолитами гидроксидов Al, имеющими регулярную структуру без дефектов, изучено, в том числе оценена свободная энергия адсорбции, параметры образования нековалентных связей и формирование органо-неорганических наногридов [4, 5]. В то же время в случае складчатых (скомканных) двумерных наноматериалов на основе AlOOH с большим количеством перегибов, изломов, краевых зон и других дефектов роль нерегулярных областей может иметь определяющее значение на такие процессы, как адсорбция ионов биологической среды и формирование гибридных органо-неорганических наноагентов с биоактивными молекулами. В настоящей работе на основе ранее полученных данных из квантово-механических расчетов [6] построены полноатомные модели нерегулярных наноструктур AlOOH. С использованием этих моделей в классической и управляемой молекулярной динамике исследовано их взаимодействие с типичной биомолекулой и формирование гибридного наноконплекса в зоне дефекта типа перегиб нанолита с изломом или краевая зона двойного нанолита.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.604.21.0156, идентификатор проекта RFMEFI60417X0156).

Литература

1. Cancer therapy and fluorescence imaging using the active release of doxorubicin from MSPs/Ni-LDH folate targeting nanoparticles / D. Li et al. // *Biomaterials*. – 2013. – No. 34 (32). – P. 7913–7922.
2. Molecular dynamics study on DNA nanotubes as drug delivery vehicle for anticancer drugs / L. Liang et al. // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. – 2017. – No. 153. – 168–173.
3. Acid-base and adsorption properties of the AlOOH 2D nanostructures as factors for regulating parameters of model biological solutions / A. S. Lozhkomev et al. // *Nanotechnologies in Russia*. – 2016. – No. 11 (7–8). – P. 506–511.
4. Tsukanov A. A., Psakhie S. G. Energy and structure of bonds in the interaction of organic anions with layered double hydroxide nanosheets: A molecular dynamics study // *Scientific reports*. – 2016. – No. 6. – P. 19986.
5. On the possibility of soft matter nanostructure formation based on mesoporous aluminum hydroxide. Prospects for biomedical applications / A. S. Lozhkomev et al. // *Physical Mesomechanics*. – 2017. – No. 20 (2). – P. 134–141.
6. Tsukanov A. A., Psakhie S. G. From the soft matter-hard matter interface to bio-self-organization and hybrid systems // *Physical Mesomechanics*. – 2017. – No. 20 (1). – P. 43–54.

УПРОЧНЕНИЕ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНО-ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Макаров А.В., Чалина М.А., Лежнин Н.В., Волкова Е.Г., Осинцева А.Л.

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Росси, e-mail: marunetchka93@mail.ru,
Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия*

Аустенитные хромоникелевые стали обладают высокой коррозионной стойкостью и технологичностью, однако не упрочняются термической обработкой.

Цель настоящего исследования – изучение возможностей деформационного упрочнения аустенитной хромоникелевой стали AISI 321 (04X17H8ГМТ) с использованием нового способа ультразвуковой ударно-фрикционной обработки (УЗУФО) [1] в сравнении с традиционной ультразвуковой ударной обработкой (УЗУО), которая обычно проводится при воздействии по нормали к обрабатываемой поверхности индентора, колеблющегося с ультразвуковой частотой. В отличие от стандартной обработки УЗУФО проводится по методу наклонного удара индентора под определенным углом к обрабатываемой поверхности, что обеспечивает усиление фрикционной составляющей взаимодействия индентора с металлом и соответствующее увеличение сдвиговой составляющей пластической деформации.

Поскольку исследуемая аустенитная сталь склонна к адгезии в условиях нагружения твердосплавным индентором без использования смазки [2], обработку образцов проводили в среде индустриального масла И-45 при сканировании с поперечным смещением твердосплавным индентором со сферической заточкой радиусом 4 мм при нагрузке 140 Н, частоте колебаний магнитофрикционного устройства 21 кГц, скорости перемещения пульсатора 600 мм/мин и шаге поперечного смещения инструмента 0,1 мм. Угол наклона инструмента к обрабатываемой поверхности изменяли в пределах от 90 до 60°. Исследовали микромеханические свойства, глубину упрочнения, изменение структуры и фазового состава поверхностного слоя, а также шероховатость поверхности стали с использованием методов микродюрметрии, кинетического микроиндентирования, трехмерной профилометрии, электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Установлено, что стандартная УЗУО (при расположении деформирующего инструмента под углом 90° к обрабатываемой поверхности) приводит к увеличению микротвердости от 200 до 385 HV 0,025 при толщине сильнодиспергированного слоя всего 4–6 мкм. При использовании в процессе УЗУФО наклонного удара под углами 80, 70 и 60° микротвердость поверхности повышается соответственно до 465, 800 и 915 HV 0,025, а глубина слоя с мелкодисперсной структурой возрастает до 20–40 мкм (для сравнения – после фрикционной обработки индентором из синтетического алмаза без смазки микротвердость не превышает 760–800 HV 0,025). Уменьшение угла наклона инструмента приводит к увеличению количества α' -мартенсита деформации от 68 до 87 объем. % на поверхности и росту ее шероховатости при отсутствии развития недопустимых процессов адгезионного схватывания. Следовательно, УЗУФО может рассматриваться в качестве эффективного финишного способа деформационного упрочнения метастабильной аустенитной хромоникелевой стали.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России по теме «Структура» № 01201463331 (проект № 18-10-2-39) и государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790148-1 при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-38-00868_мол_а.

Литература

1. Способ ультразвуковой упрочняющей обработки деталей : пат. 2643289 Рос. Федерация / Макаров А. В., Малыгина И. Ю., Буров С. В., Саврай Р. А. – опубл. в БИМП. – 2018. – № 4.
2. Effect of the Technological Conditions of Frictional Treatment on the Structure, Phase Composition and Hardening of Metastable Austenitic Steel / A. V. Makarov, P. A. Skorynina, A. S. Yurovskikh, A. L. Osintseva // AIP Conference Proceedings. – 2016. – 1785. – 040035. – DOI: 10.1063/1.4967092.

ОБЗОР МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Воронин С.В.¹, Коновалов С.В.², Чаплыгин К.К.³

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
34, Московское шоссе, Самара, 443086, Россия,
e-mail: voronin@ssau.ru, 2ksv@ssau.ru, 3chapkostya96@mail.ru*

Цель работы – проведение обзора отечественных и зарубежных источников по вопросу проблемы столкновения мелких высокоскоростных частиц космического мусора с элементами конструкции космического аппарата (КА) и влияние наносимых ими повреждений на работоспособность КА, а также сбор информации о базовых материалах узлов конструкции КА и элементов его защиты. Обзор проводится с целью дальнейшей разработки покрытия, повышающего сопротивление материалов высокоскоростным ударам мелких частиц.

В ходе работы рассмотрены различные стандарты защиты КА от частиц космического мусора, перечислены основные повреждаемые элементы, а также описаны элементы пассивной защиты КА от частиц космического мусора. Установлено, что основными элементами пассивной защиты являются защитные экраны [1], состоящие из нескольких слоев, каждый из которых имеет свои конструктивные особенности и функции. Для внешнего слоя, предназначенного для гашения кинетической энергии частиц, в настоящий момент наиболее часто применяются А12024 (отечественный аналог Д16), А16061-Т6 [2] (отечественный аналог АД33) и А17075-Т6 [3] (отечественный аналог В95). Материал второго слоя зависит от возлагаемых на него функций. Наиболее распространенными материалами второго слоя являются ткани из полимерных или углеродных волокон [1], таких как Kevlar, Nextel, Tawron, Neilon, Zylon, Spectra 1000, Carbon, также применяется пеноалюминий. Применение тканей и пеноалюминия обуславливается высокими показателями защиты, а также малым весом, что для ракетостроения является важнейшим показателем. Еще одним объяснением применения тканей является тот факт, что в листовом металле после соударения с частицами космического мусора возможно распространение трещины, приводящей к разрушению всего слоя. В ткани же разрушаются лишь волокна, непосредственно вошедшие в контакт с частицей, при этом целостность остальных слоев сохраняется.

При анализе установлено, что в отдельных случаях материал защитного экрана должен обладать высокой устойчивостью к значительным перепадам температур, коррозионной стойкостью, защитой от электромагнитного излучения, а также других факторов космического пространства, оказывающих влияние на работоспособность КА. В некоторых случаях для этих целей применяются специальные покрытия. Однако данные покрытия не рассматривались с точки зрения защиты КА от механических повреждений, так как они предназначены для других целей.

Результатом работы стал обзор, включающий данные о классификации космического мусора, видах вредных факторов космического пространства, типах и конструкциях защитных экранов, наиболее часто повреждаемые элементы, агрегаты и узлы КА, а также способы их защиты от столкновения с частицами космического мусора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.578.21.0228, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57817X0228)»

Литература

1. Christiansena Eric L., Nagy Kornel, Lear Dana M. Space station MMOD shielding // Acta Astronautica. – 2009. – No. 65 – P. 921–929.

2. Ryan Shannon, Christiansen Eric L. Hypervelocity impact testing of advanced materials and structures for micrometeoroid and orbital debris shielding // *Acta Astronautica*. – 2013. – No. 83. – P. 216–231.
3. Comparison of self-healing ionomer to aluminium-alloy bumpers for protecting spacecraft equipment from space debris impacts / A. Francesconi, C. Giacomuzzo, A. M. Grande, T. Mudric, M. Zaccariotto, E. Etemadi, L. Di Landro, U. Galvanetto // *Advances in Space Research*. – 2013. – No. 51. – P. 930–940.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Чечулина Е.А., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

пр. Комсомольский 29, Пермь, 614990, Россия,

e-mail: zhenya-chechulina@yandex.ru

Проблема появления прерывистой деформации или эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ), а также локализации пластической деформации (возникновения деформационных полос) имеет большое практическое значение, поскольку эффекты локализации играют отрицательную роль при изготовлении различных деталей. Деформирование в режиме прерывистой пластичности, особенно на заключительных стадиях технологических процессов обработки металлов давлением, ведет к существенному ухудшению качества поверхности (шероховатости), что приводит к снижению усталостной прочности, коррозионной стойкости и ухудшению аэродинамических характеристик изделий. Основной задачей теоретического исследования неустойчивого пластического деформирования является создание адекватных моделей, объясняющих процессы локализации деформации в материалах под нагрузкой [1].

Полагается, что все эффекты, связанные с прерывистой пластичностью, обусловлены динамическим деформационным старением (ДДС), т. е. взаимодействием между дислокациями, временно остановившимися на препятствиях (дислокациях леса или других дефектах) и диффундирующими атомами примеси, которые дополнительно закрепляют дислокации.

Физические процессы, обуславливающие ДДС в сплавах, приводят к изменению микроструктуры, что отражается на макросвойствах продукции. Поэтому для понимания и моделирования процессов, происходящих в ходе деформации материала, необходимо знать термомеханические условия возникновения ДДС, связи физических механизмов старения с другими механизмами упрочнения и разупрочнения.

В силу того, что свойства материала на макроуровне в значительной степени определяются его микроструктурой, для качественного воспроизведения пластической неустойчивости необходимо введение описания самоорганизации микроструктурных процессов, которые в конечном счете могут привести к спонтанному появлению локализации деформации. Для этого целесообразно использовать физические подходы на микромасштабном уровне. В работе предложена трехуровневая математическая модель, предназначенная для описания неустойчивого пластического деформирования в поликристаллических материалах при термомеханическом нагружении, в частности – эффекта Портевена–Ле Шателье, основанная на рассмотрении эволюции внутренней микроструктуры и диффузных процессов [2].

При построении модели применяется многоуровневый подход, основанный на использовании в ее структуре внутренних переменных – параметров, характеризующих состояние и эволюцию мезо- и микроструктуры материала. Для учета наиболее важных термически активируемых механизмов деформирования в работе вводятся соответствующие кинетические уравнения. Текущее состояние микроструктуры отслеживается через плотности дислокаций, которые служат внутренними переменными мезоуровня. Эволюция плотности дислокаций связана с конкуренцией процессов генерации и аннигиляции дислокаций различного вида. Плотность дислокаций для каждой системы скольжения кристаллита полагается однородной и зависящей от времени.

Наличие локализованных препятствий в плоскости скольжения, таких как дислокации леса, примесные атомы или выделения вторичных фаз, могут временно остановить движущиеся дислокации. В работе учитывается упрочнение за счет образования барьеров Ломера–Коттрелла при взаимодействии расщепленных дислокаций, которые являются мощным препятствием для движения дислокации, а также упрочнение за счет образования облаков примесных атомов и взаимодействия дислокаций друг с другом.

Разработанный подход позволяет получить количественные характеристики эволюции параметров микроструктуры в зависимости от степени деформации, выявить их влияние на макроскопические параметры.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01292).

Литература

1. Трусов П. В., Чечулина Е. А. Прерывистая текучесть: модели, основанные на физических теориях пластичности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 1. – С. 134–163. – DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.09.
2. Чечулина Е. А. Трехуровневая модель для описания эффекта Портевена-Ле Шателье // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, вып. 3. – С. 1419–1422. – DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1419-1422.

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 12Х18Н9Т, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ

Чумаевский А.В., Калашникова Т.А., Филиппов А.В.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4 пр. Академический, г. Томск, 634055Россия,
e-mail: ch7av@gmail.com, gelombang@ispms.tsc.ru, avf@ispms.ru*

Аддитивное производство деталей из полимерных материалов и композитов на полимерной основе в настоящее время являются одним из наиболее востребованных методов получения деталей сложной формы. Данным методом производятся детали практически неограниченных размеров и форм для различных отраслей промышленности и приборостроения. При этом в современной научной и технической сфере имеется ряд задач по производству деталей сложной формы из металлических материалов с заданными свойствами внутренней структуры характеристиками поверхности. Для большинства методов производства деталей из металлических материалов аддитивным способом характерно применение технологии, основанной на поэтапном сплавлении с основой мелкодисперсного порошка металлического материала. Следует отметить, что использование для 3D-печати металлическим материалом проволоки металлов, вместо порошка, позволяет расширить возможности метода как с точки зрения увеличения номенклатуры применяемых материалов, так и с точки зрения улучшения качества поверхности получаемых изделий. Но в результате применения схемы печати, основанной на подаче проволоки в зону сплавления материала происходит кардинальное изменение как внутренней структуры материала, так и морфологических параметров поверхности. Исследованию морфологии поверхностного слоя образцов, полученных аддитивным методом из стали 12Х18Н9Т, посвящена настоящая работа.

В работе проводили исследования плоских образцов, полученных из проволоки нержавеющей стали 12Х18Н9Т при ускоряющем напряжении 35 кВ, токе луча 20 мА, скорости подачи проволоки 10 мм/с, скорости перемещения изделия относительно электронного луча 0,2 м/с. Смещение по координате Z (толщина наносимого слоя) составляло 0,5 мм, диаметр развертки луча 2мм, частота развертки 1кГц, ширина линий заполнения 2,5 мм.

Исследование поверхностного рельефа цилиндрических образцов осуществлялось на лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS 4100. Проведенные исследования показали, что поверхность образцов, полученных методом 3D-печати, представлена волнистым рельефом, коррелирующим с размером наносимых на поверхность слоев. Высота выступов или впадин над поверхностью на данном этапе исследований составляет до 200 мкм, что оставляет необходимость в ряде случаев проведения постобработок после изготовления образцов с высокими требованиями к качеству поверхности.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛУЧА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

Чучкова Л.В., Ложкина Е.А., Овдина Д.С., Белов А.С.

*Новосибирский Государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия.
e-mail: L.Chuchkova@bk.ru*

Цель работы – формирование высокопрочных покрытий с применением электронно-лучевого оплавления порошковых смесей в воздушной среде и последующие исследования комплекса эксплуатационных свойств полученных материалов. В качестве основы использовали заготовки из титанового сплава ВТ1-0. Для синтеза высокопрочных частиц выбран порошок карбида бора, который в процессе кристаллизации позволил сформировать кристаллы карбида и борида титана с высокой твердостью и износостойкостью. В работе изучено влияние концентрации порошка карбида бора в исходной наплавочной смеси (10, 20 и 30 вес. %), на структурные преобразования и эксплуатационные характеристики полученных покрытий.

В результате фазового анализа в поверхностно-легированных слоях зафиксировано присутствие трех фаз, а именно α (α') – Ti, карбид (TiC) и моноборид (TiB) титана. Отсутствие пиков оксида титана позволяет судить об эффективной защите ванны расплава от окисления флюсами, входящими в состав наплавочной смеси. Структурные исследования позволили сделать вывод, что увеличение концентрации карбида бора в исходной порошковой насыпке приводит к увеличению размеров и объемной доли упрочняющих частиц карбида и моноборида титана. Конечная структура таких покрытий представляла собой равномерно распределенные в титановой матрице кристаллы карбида титана округлой и дендритной морфологии, а также частицы моноборида титана, по форме близкие к гексагональной.

ДюрOMETрические исследования показали, что максимальный уровень микротвердости, равный 5650 МПа, был зафиксирован у образцов, сформированных при наплавке 30 вес. % порошка карбида бора в исходной порошковой смеси. Оценку характера разрушения и уровня ударной вязкости полученных образцов после оплавления проводили по результатам испытаний на ударный изгиб. Средний уровень ударной вязкости сформированных материалов не зависит от концентрации наплавляемого порошка карбида бора и в сравнении с материалом основы снизился в 1,4 раза. Фактографические исследования свидетельствуют о повышении степени охрупчивания поверхностно-легированных слоев в результате формирования высокопрочной фазы карбида и моноборида титана.

Для проверки исследуемых слоев на стойкость к окислению проведены испытания, позволяющие определить фазовые изменения при высоких температурах, а также рассчитать прирост массы образцов за счет насыщения поверхности кислородом. Испытания проводились при 600, 750 и 900 °С в течение 100 ч. В результате исследований образцов при наименьшей температуре был зафиксирован незначительный прирост массы до 0,35 мг/см² и 0,035 мг/см² для титанового сплава ВТ1-0 и поверхностно-легированных слоев, полученных при 20 вес. % карбида бора, соответственно. Увеличение температуры нагрева до 900 °С приводит к активному окислению поверхностных слоев образцов; прирост массы после 100 ч испытаний составил 180 мг/см² для основного материала и 30 мг/см² для материала покрытия.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение пучка релятивистских электронов для оплавления порошковой смеси, содержащей карбид бора, позволяет сформировать равномерные бездефектные покрытия. Легирование карбидом бора позволяет повысить твердость поверхностных слоев технически чистого титана до 5650 МПа и стойкость к окислению в 6 раз. Однако формирование покрытий, содержащих высокопрочные частицы карбида и моноборида титана снижают средний уровень ударной вязкости в 1,4 раза в сравнении с титановым сплавом ВТ1-0.

ТЕОРЕТИКО-ПОЛЕВАЯ ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗЕРНАХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Шавшуков В.Е., Ташкинов А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614990, Россия,
e-mail: shavshukov@pstu.ru, tash@pstu.ru

Традиционный способ нахождения полей деформаций в неоднородных упругих телах с помощью дискретизации методом конечных элементов наталкивается на значительные трудности в случае поликристаллических тел. Причина заключается в огромном количестве зерен (миллионы в макрообразце), которые должны быть приняты во внимание, так что полное число конечных элементов становится слишком большим для практических вычислений. Дискуссия о необходимом количестве зерен в компьютерных моделях для адекватного описания макроскопических образцов поликристаллов продолжается до настоящего времени. В данной работе предлагается альтернативный подход, основанный на аналогиях с квантовой теорией поля.

В квантовой теории центральным пунктом является декомпозиция непрерывных полей на сумму дискретных состояний. Это достигается процедурой квантования. В механике поликристаллов [1] мы разлагаем глобальное поле деформаций ε_{ij} и глобальный тензор модулей упругости C_{ijmn} на дискретную сумму локальных полей с использованием индикаторных функций зерен $\lambda_\xi(\mathcal{R})$ (равных единице в данном зерне и нулю вне его):

$$\varepsilon_{ij}(\mathcal{R}) = \sum_{\xi=1}^N \lambda_\xi(\mathcal{R}) \varepsilon_{ij}^{(\xi)}(\mathcal{R}) \text{ и } C_{ijmn}(\mathcal{R}) = \sum_{\xi=1}^N \lambda_\xi(\mathcal{R}) C_{ijmn}^{(\xi)}(\mathcal{R}) \quad (N \text{ есть число зерен в теле}).$$

После такого разложения точное интегральное уравнение для глобальных деформаций

$$\varepsilon_{ij}(\mathcal{R}) = \varepsilon_{ij}^* + \int_V d\mathcal{R}'_1 g_{ijkl}(\mathcal{R} - \mathcal{R}'_1) [C_{klmn}(\mathcal{R}'_1) - \langle C_{klmn} \rangle] \varepsilon_{mn}(\mathcal{R}'_1),$$

где $g_{ijkl}(\mathcal{R})$ – тензор Грина осредненной среды, трансформируется в систему взаимосвязанных уравнений для локальных деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^{(\xi)}(\mathcal{R}_\xi) &= \varepsilon_{ij}^* + \int_{\omega_\xi} d\mathcal{R}'_\xi g_{ijkl}(\mathcal{R}_\xi - \mathcal{R}'_\xi) [(C_{klmn}^{(\xi)}(\mathcal{R}'_\xi) - \langle C_{klmn} \rangle)] \varepsilon_{mn}^{(\xi)}(\mathcal{R}'_\xi) + \\ &+ \sum_{\eta \neq \xi} \int_{\omega_\eta} d\mathcal{R}'_\eta g_{ijkl}(\mathcal{R}_\xi - \mathcal{R}'_\eta) [(C_{klmn}^{(\eta)}(\mathcal{R}'_\eta) - \langle C_{klmn} \rangle)] \varepsilon_{mn}^{(\eta)}(\mathcal{R}'_\eta). \end{aligned}$$

Первый член в правой части есть решения для глобального поля в гомогенизированном теле, второй член представляет внутриверенное взаимодействие деформаций, а члены под знаком суммы описывают межзеренные взаимодействия. Взаимодействие существенно зависит от типа анизотропии зерен. Для решения системы мы используем теорию возмущений по межзеренному взаимодействию [2], а для локальных полей – кусочно-постоянную аппроксимацию путем разбиения каждого зерна на малые субзерна так, чтобы внутри субзерна поле можно было считать однородным. Это сводит систему интегральных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений, которые решаются численно.

Оказывается, с одной стороны, метод теории возмущений сходится довольно быстро, и с точностью в несколько процентов можно ограничиться поправками 1-го порядка. С другой стороны, межзеренное взаимодействие является дальнедействующим. Лишь на расстоянии шести–семи средних диаметров зерен интенсивность взаимодействия уменьшается до 1–2 % от интенсивности взаимодействия соседних зерен. Для сферических зерен межзеренное взаимодействие является единственным источником неоднородности деформаций в них. Модельные вычисления выполнены для поликристалла

цинка при макросдвиге. Неоднородные деформации в зерне флуктуируют в соответствии со случайной микроструктурой окружения. Максимальные значения деформации в зерне превосходят макроскопическую деформацию на 38 %. Максимальная неоднородность достигается при определенной конфигурации окружающих зерен, образующих специфический кластер. Оценивается вероятность появления таких кластеров в случайной микроструктуре макрообразца.

Мы обосновываем, что адекватная модель поликристаллического тела должна содержать более миллиона зерен для описания макроскопического поведения. Наш подход позволяет принять во внимание такое количество зерен. Метод применим для упругих и упруго-пластических проблем.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Пермского края грантами 18-01-00675, 16-01-00682 и 17-41-590433-р_а.

Литература

1. Shavshukov V., Tashkinov A. Quantum field theory approach to mechanics of polycrystals // Solid State Phenomena. – 2016. – Vol. 243. – P.131–138.
2. Ташкинов А. А., Шавшуков В. Е. Решение задач механики деформирования поликристаллических материалов на основе теории возмущений // Вычислительная механика сплошных сред. –2016. – Т. 9. – № 4. – С. 486–497.

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ И УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Шалковский Д.М., Петровцев А.В., Варфоломеев Д.А., Якимова М.Н.,
Дремов В.В., Козлов Е.А., Ширококов А.Е., Кучко Д.П., Юсупов Д.Т.,
Борщевский А.О., Павленко А.В., Малюгина С.Н.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,
д. 13, ул. Васильева, г. Снежинск, 456770, Россия, d.m.shalkovskiy@mail.ru*

В докладе представлено описание модели сдвиговой прочности, используемой для расчетно-теоретического моделирования ударно-волновых экспериментов по изучению свойств закаленной стали 30ХГСА и магниевого сплава МА-14 при низко- и высокоинтенсивном нагружении. Калибровка параметров модели проводилась по экспериментальным диаграммам деформирования исследуемых образцов при статическом и динамическом режимах нагружения при различных температурах, также использовалась информация, полученная в ударно-волновых опытах, для учета изменения прочностных свойств при высоких скоростях деформации.

Моделирование опытов с низкоинтенсивным нагружением позволили провести уточнение описания упругопластических свойств и калибровку модели разрушения. Результаты взрывных экспериментов с высокоинтенсивным нагружением образцов стали 30ХГСА с разгрузкой ударно-сжатых образцов в оконные материалы использованы для проверки фазовой диаграммы, верификации кинетики прямых и обратных фазовых превращений, уточнения влияния изменения фазового состояния на прочностные свойства. Представленная модель позволила воспроизвести сложное изменение прочностных свойств образцов магниевого сплава МА-14 при изменении интенсивности нагружения.

КОРРЕЛЯЦИЯ СУБШЕРОХОВАТОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ

Суслов А.Г.¹, Шалыгин М.Г.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт»
Россия, Москва, Каширское шоссе, д. 31,

²Брянский государственный технический университет,
д. 7, б-р 50-лет Октября, Брянск, 241035, Россия,
e-mail: migshalygin@yandex.ru

Срок службы машин и механизмов во многом обусловлен качеством поверхностного слоя трущихся деталей. Наличие на ответственных поверхностях деталей машин нанонеровностей в значительной степени обусловлено формой и расположением кристаллической решетки тел. Совокупности элементарных ячеек кристаллической решетки формируют зерна металлов, которые оказывают влияние на качество поверхностного слоя и, следовательно, на его физико-механические свойства при эксплуатации. Анализ связи субшероховатости поверхности и фазового состава материала позволит прийти к более четкому пониманию влияния зернистости материала на качество поверхностного слоя.

Цель исследования – определение связи субшероховатости и фазового состава поверхности.

Исследования проводились на плоских, закаленных до мартенситного состояния образцах, изготовленных из хромистой стали 40X с твердостью 48...53 HRC. Поверхность образцов подвергалась чистовому шлифованию и имела фактическую шероховатость $R_a = 0,4$ мкм. Исследования проводили на сканирующем зондовом микроскопе в режимах снятия профиля поверхности и в режиме фаз.

В процессе проведения исследований были получены следующие результаты. Средний размер зерна на исследуемой поверхности составил $L_z = 27,47$ нм. Профиль субшероховатости снимали с того же участка, что и фазу. С целью устранения влияния шероховатости на результаты применяли преобразование Фурье, фильтр Виннера и выравнивание сплайном. Среднее значение шага субшероховатости по средней линии, измеренное в 6 сечениях, равно $Sm_c = 28,67$ нм.

Обработка полученных данных методами регрессионного анализа позволила выявить уравнение связи субшероховатости и фазового состава поверхности, которое объясняет 56,5 % вариации образования субшероховатости поверхности фазовым составом и его дефектами. Проверка гипотезы об однородности генеральных совокупностей субшероховатости и фазового состава проводилось с помощью критериев Колмогорова–Смирнова ($D_{40x} = -0,237541$; $p\text{-level}_{40x} = 0,001$), Манна–Уитни ($Z_{40x} = 1,219172$; $p\text{-level}_{40x} = 0,0007$). Согласно данным критериям полученные результаты имеют однородные генеральные совокупности, и данные параметры не отличаются друг от друга по наблюдаемому признаку. Оба критерия подтвердили правильность выдвинутых гипотез, таким образом, можно принять во внимание, что шаг субшероховатости по средней линии и фазовая структура поверхности отличаются сдвигом на некую константу, в качестве которой могут выступать дефекты кристаллической решетки.

Не менее значимой эксплуатационной характеристикой деталей машина является коэффициент трения. Анализ гистограммы распределения локальных коэффициентов трения на поверхности с размерами 300×300 нм. показал, что измеренные значения локального коэффициента трения имеют большие хвосты, следовательно, анализируемые данные имеют большую дисперсию и не подчиняются нормальному закону распределения. Это говорит о неоднородности распределения значений локального коэффициента трения по измеряемой поверхности. Корреляционный и регрессионный анализы показывают корреляции между субшероховатостью, фазовым составом поверхности и дефектами кристаллической решетки.

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие выводы. Проведенные исследования подтверждают гипотезу о наличии корреляции между субшероховатостью и дефектами кристаллической решетки. Обеспечение заданных параметров субшероховатости поверхности деталей машин возможно путем выбора фазового состава поверхностного слоя и варьированием дефектов кристаллической решетки.

ВИБРОДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА УСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Шардаков И.Н.¹, Шестаков А.П.¹, Быков А.А.², Глот И.О.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Королева, д. 1 г. Пермь, 614013,

²Пермский национальный исследовательский технический университет,

Комсомольский пр, 29, г. Пермь, 614990,

e-mail: shardakov@icmm.ru

В процессе разрушения железобетонных конструкций начинается с образования трещины в бетоне, что приводит к существенному снижению жесткости конструкции. При этом арматура, находящаяся в области трещины, становится не защищенной от внешней агрессивной среды. Одним из вариантов восстановления характеристик железобетона является инъецирование трещин эпоксидной смолой. Это позволяет восстановить жесткость и прочность конструкции, а также защитить арматуру. Результативность такого способа реставрации бетонных конструкций достигается благодаря высоким прочностным и адгезивным свойствам эпоксидных смол, поэтому инъецированные трещины становятся не менее прочными, чем ремонтируемый бетон.

Высокая эффективность инъецирования достигается при полном заполнении трещины эпоксидной смолой. Однако визуально проконтролировать полноту заполнения невозможно. Поэтому для подтверждения качества инъецирования применяются инструментальные методы контроля. В настоящей работе предложена система контроля качества инъецирования трещины в бетоне на основе регистрации вибрационных переходных процессов. Построена математическая модель железобетонной балки, адекватно описывающая распространение упругих волн при ударных воздействиях. Эта модель дополнена областью, в которой реализуется процесс образования трещины и ее последующего ремонта. На основе этой модели рассмотрено изменение характеристик фронта волны при прохождении области, содержащей повреждения.

Анализ эволюции фронта позволил сформировать количественный критерий искажения волны, который отражает степень повреждения бетона. Он определяется как отношение амплитуд первых полуволн ускорений, зарегистрированных на датчиках, расположенных после трещины и перед трещиной. Такой критерий не зависит от амплитуды удара и условий закрепления балки, поскольку на анализируемых интервалах времени отраженные волны не успевают достигнуть датчиков. Вместе с тем обнаружена сильная зависимость значения критерия от расстояния между местом удара и ближайшим датчиком, а также от длительности ударного импульса. Эти зависимости проанализированы и для каждой длительности импульса найдены оптимальные точки приложения импульсного воздействия. Для всех рассмотренных позиций места удара по отношению к трещине вычислено значения критерия и показано его изменение при развитии трещины в бетоне и в процессе залечивания трещины. Для балки без трещины построены зависимости, связывающие точность определения критерия с точностью позиционирования места удара и регистрирующих датчиков, а также с расстоянием между датчиками.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 14-29-00172).

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ СТРУКТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Швейкин А.И.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990,
пр. Комсомольский, 29, Пермь, Россия,
e-mail: elvira16_90@mail.ru*

В работе предложена модификация многоуровневой статистической модели на основе физической теории упруговязкопластичности [1], описывающая деформирование поликристаллических материалов в широких диапазонах температурно-скоростных воздействий и состояниях зеренной структуры – в режимах упруговязкопластичности и структурной сверхпластичности (СП), последний из которых позволяет значительно расширить спектр возможных применений металлов и сплавов в промышленных технологиях с уменьшением энерго- и трудозатрат. Преимуществом выбранного подхода является возможность явного описания эволюционирующей внутренней структуры материала и физических механизмов деформирования.

Используется новая формулировка определяющих соотношений, позволяющая корректно описывать деформирование при больших градиентах перемещений [2]. Основным направлением развития вышеупомянутых моделей [1] является включение описания механизма зернограничного скольжения (ЗГС), преобладающего в режиме структурной СП, и учет температуры. Подмодель ЗГС выделяется в отдельный структурный уровень, деформационные характеристики (скорости зернограничных сдвигов в представительном макрообъеме) определяются по аналогии с уравнением Орована с помощью осреднения скоростей смещений пар соседних кристаллитов по общей границе и формулируются на основе закона типа Аррениуса. Для передачи воздействий с макроуровня на мезоуровень применяется модифицированная гипотеза Фойгта, учитывающая реализацию части деформаций за счет ЗГС. Анализ результатов экспериментальных исследований СП в различных металлах и сплавах показал, что внутризеренное дислокационное скольжение (ВДС) и зернограничная диффузия как аккомодационные механизмы значительным образом влияют на реализацию ЗГС: приток внутризеренных дислокаций в границу делает ее более дефектной (неравновесной), повышает энергию границы и способствует ЗГС; в ходе зернограничной диффузии происходит «выглаживание» границы, что также облегчает ЗГС. Кроме того, в поликристаллических материалах скольжение по каждой границе ограничено наличием соседних кристаллитов, которые могут препятствовать осуществлению ЗГС. Все перечисленные факторы учитываются в соотношении для критических напряжений зернограничных сдвигов – законе упрочнения ЗГС [3]. Взаимосвязь механизмов ЗГС и ВДС учитывается и в соотношении для критических напряжений внутризеренных сдвигов.

Важным структурным условием для реализации деформирования в режиме СП является наличие равноосной мелкозернистой структуры с преобладанием высокоугловых границ. В ряде сплавов в процессе испытания на растяжение в режиме СП даже при умеренных температурах наблюдается динамическая рекристаллизация, сопровождающаяся ограниченным ростом среднего размера зерна в материале и поддержанием необходимой равноосной формы зерен. Разработанная модификация модели включает описание размеров, формы, взаиморасположения кристаллитов и границ, а также их изменения при деформировании с учетом процессов динамической рекристаллизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект №9.7434.2017/8.9).

Литература

1. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры / П. В. Трусов, А. И. Швейкин, Е. С. Нечаева, П. С. Волегов. – Физическая мезомеханика. – 2012. – № 15 (1). – С. 33–56.
2. Трусов П. В., Швейкин А. И., Янц А. Ю. О разложении движения, независимых от выбора системы отсчета производных и определяющих соотношениях при больших градиентах перемещений: взгляд с позиций многоуровневого моделирования // Физическая мезомеханика. – 2016. – № 19 (2). – С. 47–65.
3. Trusov P. V., Sharifullina E. R., Shveykin A. I. Three-level modeling of fcc polycrystalline inelastic deformation: grain boundary sliding description // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 71. – P. 012081.

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В РЕЖИМЕ СТРУКТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Швейкин А.И., Трусов П.В., Шарифуллина Э.Р.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990,
просп. Комсомольский, 29, Пермь, Россия,
e-mail: shveykin@pstu.ru*

Предложена модификация многоуровневой статистической модели, учитывающая ключевые механизмы – внутризеренное дислокационное скольжение (ВДС), зернограничное скольжение (ЗГС), динамическую рекристаллизацию для широкого диапазона температурно-скоростных воздействий и различного состояния зеренной структуры, в зависимости от которых меняется роль физических механизмов, их вклад в (текущую) реализацию неупругого деформирования в различных режимах [1]. Разработан алгоритм реализации модели, на основе которого создан комплекс вычислительных программ, позволяющий исследовать процессы деформирования материалов с анализом эволюции их внутренней структуры и эффективных физико-механических характеристик.

В качестве моделируемого объекта выбраны материалы класса промышленных алюминиевых сплавов, для многих из которых при оптимальных для сверхпластичности (СП) условиях наблюдается двухстадийность кривых зависимости напряжений от деформаций: для первой стадии характерен рост напряжений с ростом степени деформации, при дальнейшем увеличении степени деформации происходит перегиб кривой и начинается вторая стадия, определяемая ниспадающим участком кривой [2]. Отмечается, что на первой стадии преобладающим механизмом является ВДС, на второй – ЗГС, при этом важную роль играет динамическая рекристаллизация, в ходе которой происходит рост среднего размера зерна в материале, уменьшение плотности дислокаций в зернах и возвращение их вытянутой формы, полученной на первой стадии, к равноосной. Проведено моделирование растяжения представительного макрообъема поликристаллов некоторых алюминиевых сплавов при различных температурно-скоростных условиях (рассматриваются умеренные температуры, не превосходящие 0,6 гомологической) и исходном состоянии внутренней структуры материала (форма и размер зерна). Проанализировано влияние варьирования исходных условий на реализацию различных механизмов и их вклад в общую деформацию, полученные результаты сопоставлены с данными экспериментальных исследований по рассматриваемым сплавам. В частности продемонстрировано, что в режиме структурной СП при оптимальных для данного материала условиях с некоторой степенью деформации ЗГС становится лидирующим, а ВДС – аккомодационным механизмом. Исследование эволюции зеренной структуры в процессе деформирования показало важность учета динамической рекристаллизации.

Полученные результаты численных экспериментов характеризуют используемую многоуровневую модель как перспективную с точки зрения ее возможностей для описания различных режимов деформирования. Показано, что разработанная модификация модели, учитывающая значимые механизмы – ЗГС и динамическую рекристаллизацию, позволяет описать наблюдаемые в экспериментах закономерности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект №9.7434.2017/8.9).

Литература

1. Trusov P. V., Sharifullina E. R., Shveykin A. I. Three-level modeling of fcc polycrystalline inelastic deformation: grain boundary sliding description // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 71. – P. 012081.
2. Myshlyaev M. M., Shpeizman V. V., Kamalov M. M. On the multistage nature of deformation of the microcrystalline aluminum-lithium alloy 1420 under superplasticity conditions // Physics of the Solid State. – 2001. – Vol. 43, no. 11. – P. 2099–2104.

ФОРМИРОВАНИЕ ДИССИПАТИВНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ ИЗНОСОСТОЙКИХ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Филиппов М.А.¹, Никифорова С.М.¹, Швейкин В.П.^{1,2},
Плотников Г.Н.³, Шарапова В.А.¹

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,

²Институт машиноведения УрО РАН,

³ООО «УралмашНГХолдинг», г. Екатеринбург

Наиболее износостойкими из широко используемых в промышленности сплавов являются износостойкие хромистые чугуны (ИЧХ). Основной структурной особенностью износостойких белых чугунов является наличие большого количества твердых карбидов (легированного цементита и специальных карбидов), обеспечивающих высокую стойкость чугуна в условиях абразивного изнашивания. На свойства ИЧХ оказывает также большое влияние и металлическая основа, которая должна быть достаточно твердой, прочной и обеспечивать хорошее закрепление карбидных частиц.

Количество карбидов определяется содержанием углерода, характером и степенью легирования и может регулироваться в пределах от 4÷12 % (в чугунах с карбидами МС) до 50 % (в низколегированных эвтектических чугунах). Наиболее распространенные марки ИЧХ имеют в структуре 20÷30 % карбидов (хромистые, хромомолибденовые, комплекснолегированные чугуны) [1].

Металлическую основу (матрицу) ИЧХ составляют аустенит и продукты его превращения. В наибольшей степени требованиям, предъявляемым к ИЧХ, отвечают мартенсит и метастабильный остаточный аустенит однако соотношение и химический состав этих фаз, обеспечивающих максимальную износостойкость, остаются малоизученными.

Цель работы – изучение особенностей формирования фазового состава и структуры металлической основы двух хромистых белых чугунов с разным типом карбидов – M_7C_3 и $M_{23}C_6$ – 260X16M2 и 250X25MФТ в зависимости от режимов термической обработки для выбора технологии, обеспечивающей максимальную абразивную износостойкость применительно к материалу рабочих лопаток *дробебетных аппаратов*.

Формирование диссипативной микроструктуры металлической основы чугунов 260X16M2 и 250X25MФТ, состоящей из мартенсита и большого количества метастабильного остаточного аустенита с содержанием углерода 0,6–0,7 %, превращающегося в мартенсит деформации в процессе изнашивания с высокой способностью к фрикционному упрочнению, достигается закалкой или нормализацией с нагревом до температур 1125–1170 °С. Такая микроструктура формируется в образцах чугунов сечением до 30 мм при охлаждении в масле или ускоренном охлаждении под струей вентилятора (воздушной закалке) и обеспечивает повышенную абразивную износостойкость по сравнению с закалкой от обычных температур (1000–1040 °С), несмотря на более высокую исходную твердость во втором случае.

Показано, что с помощью специальной программы можно прогнозировать химический состав металлической основы исследуемых чугунов с достаточной точностью в зависимости от исходного химического состава чугуна и скорости охлаждения. Так, металлическая основа чугуна 260X16M2 по химическому составу соответствует метастабильной аустенитной стали 70X12МЛ, что подтверждается микрорентгеноспектральным и рентгеноструктурным анализами.

Максимальной износостойкости соответствует и наибольшая микротвердость рабочей поверхности после изнашивания. Для сплава 260X16M2 максимальная износостойкость ($\epsilon = 2,8$ по отношению к валковой стали 150ХНМЛ) и микротвердость ($H_{50} \geq 11$ ГПа) достигаются после высокотемпературной закалки и высокого отпуска (550 °С) вследствие явления вторичной закалки.

Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. – М. : Metallurgia, 1983. – 176 с.

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Цветков Р.В., Епин В.В.

*ИМСС УрО РАН, 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Россия,
e-mail: shap@icmm.ru*

Исследование поведения сложных строительных конструкций в условиях критического состояния имеет первостепенное значение при решении задач их безопасной эксплуатации. Недооценка решения этих задач приводит к человеческим жертвам и гигантским материальным потерям. Одним из современных подходов, позволяющих решать задачи безопасной эксплуатации конструкций, является использование автоматизированных систем деформационного мониторинга. В их основе лежат математические модели, адекватно описывающие работу конструкции в до критических и критических стадиях деформирования. Это позволяет предсказать время и место реализации критического состояния в том или ином элементе конструкции.

Разработка и верификация таких моделей возможна только при проведении натуральных экспериментов. Для их реализации спроектирован модельный объект отражающий деформационные процессы в полномасштабных строительных конструкциях. Он представляет собой фрагмент 4-х этажное монолитное здание в масштабе 1:2. Его общая высота составляет 6 м, длина 9 м и ширина 6 м. Для возведения и испытания этого объекта создан испытательный стенд. Он позволит провести серию экспериментов, которые включают в себя все стадии испытания конструкции: упругое (бездефектное) деформирование, образование дефектов, их развитие, взаимодействие и полное разрушение конструкции.

Одним из фрагментов системы деформационного мониторинга является регистрация и последующий анализ волновых процессов в конструкции. Он позволяет определить наличие дефектов, их расположение и размер. Эффективность решения этих задач зависит от выбора следующих параметров системы: места возбуждения упругой волны; места регистрации; доминирующей частоты импульсов. Обоснованный выбор этих параметров возможен на основе математической модели адекватно описывающей динамические процессы в конструкции.

В рамках настоящей работы выполнена верификация математической модели на основе сравнения с результатами натуральных измерений. Которые заключались в ударном возбуждении упругих волн в различных конструктивных элементах модели (колонах, плитах перекрытия) и регистрации их распространения с помощью акселерометров. Процесс регистрации состоял в синхронной записи показаний с 8 акселерометров. Первый располагался на ударнике, а остальные – в точках регистрации. Такая схема эксперимента позволила задать граничные условия в месте удара как функцию ускорения ударника, умноженную на его массу. Это позволило непосредственно сравнивать виброграммы, полученные в эксперименте и вычисленные на основе модели.

На основе модели проведена серия численных экспериментов в рамках, которых сравнивались виброграммы, полученные с целой конструкции и конструкции с типовым разрушением в виде трещины. На основе анализа этих решений выбраны наиболее информативные диагностические параметры, которые позволяют контролировать процесс образования и развития трещины, а также выбраны места расположения актуаторов и сенсоров, при которых достигается максимальная чувствительность диагностических параметров. Такой анализ позволит создать эффективную систему вибрационного контроля процесса трещинообразования железобетонной конструкции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 14-29-00172).

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ШПАНГОУТА АВИАЦИОННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ОСНАЩЕННОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

Шипунов Г.С., Воронков А.А., Пеленев К.А., Шестакова К.Н.

*ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д.29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Россия,
e-mail: gsshipunov@gmail.com*

Для совершенствования современных авиационных двигательных установок лидеры мирового авиадвигателестроения отказываются от применения металлов и сплавов в пользу полимерных композиционных материалов (ПКМ). Заменяются даже особо ответственные, силовые конструктивные элементы, работающие в условиях сложного нагружения. Этот факт вызывает повышение требований по безопасности и надежности изделий из ПКМ. Однако опыт эксплуатации, проектирования и прогнозирования механических характеристик ПКМ значительно меньше, чем для большинства металлов и сплавов. С учетом вышесказанного становятся актуальными проблемы оценки физико-механических характеристик и мониторинга состояния подобных конструкций. Данную проблему можно решить благодаря основной особенности ПКМ – материал создается вместе с конструкцией. Принцип создания ПКМ одновременно из отдельных компонентов (волокон, тканей, матрицы, и т. п.) позволяет найти решение проблемы обеспечения его надежности, а именно создание материала с возможностью диагностики и мониторинга его состояния в процессе стендовых, летных испытаний и, в перспективе, при длительной эксплуатации – волоконно-оптических датчиков, внедренных в состав ПКМ в процессе его создания.

Цель работы заключается в демонстрации возможности создания конструкции и оценки напряженно-деформированного состояния силового шпангоута авиационной двигательной установки с внедренными волоконно-оптическими датчиками изготовленного методом пропитки под давлением (RTM).

Для решения поставленной задачи разработана конструктивно-технологическая схема изготовления силового шпангоута, оснащенного волоконно-оптическими датчиками, проведен расчет напряженно-деформированного состояния, в программном пакете ANSYS при эксплуатационных нагрузках для определения зон концентрации напряжений и определения точек контроля конструкции, изготовлен конструктивно-подобный элемент, проведены экспериментальные исследования.

Результаты данных исследований будут использоваться для создания прототипа системы мониторинга состояния конструкций из полимерных композиционных материалов в современных авиационных двигательных установках. Исследования проводились с применением оборудования уникальной научной установки «Исследовательский комплекс для проведения научно-технологических исследований в области создания изделий из полимерных композиционных материалов».

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 11.2391.2017/4.6.

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОЛЛИМАТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ДИФРАКТОМЕТРА НА ВЕЛИЧИНУ ИЗМЕРЕННЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Трофимов В.В., Ширяев А.А., Карманов В.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614013, Россия,
e-mail: tvn@mail.ru, alex_sh_23-1@mail.ru, karmanovs@yandex.ru*

Остаточные напряжения сказываются на поведении изделий при обработке и эксплуатации. Поэтому при изготовлении изделий газотурбинных установок (ГТУ) и газотурбинных двигателей (ГТД) в конструкторско-технологической документации (КТД) в обязательном порядке регламентируется требуемый уровень остаточных напряжений (ОН). Для корректного определения величины ОН методом рентгеновской дифрактометрии необходимо, чтобы коллиматор располагался перпендикулярно плоскости измерения.

В машиностроении, в частности при изготовлении ГТУ и ГТД, используются детали с переменной геометрией – лопатки компрессора и турбины, отверстия в дисках и др., и указанное условие не всегда выполнимо. Поэтому цель нашей работы – оценка влияния положения коллиматора рентгеновского дифрактометра относительно поверхности измерения на величину измеренных ОН.

Для оценки влияния положения коллиматора использовался плоский образец из стали 09Г2С, на поверхности которого фрезерованием были нанесены дорожки шириной 7 мм. При фрезеровании варьировались режимы обработки: 1) скорость резания V в диапазоне 50–80 м/мин; 2) подача на зуб S_z – 0,04–0,08 мм/зуб, глубина резания a_z – 0,1–0,3 мм.

Измерение ОН проводилось методом рентгеновской дифрактометрии с использованием роботизированного комплекса XStress 3000 G3 и коллиматором, диаметром 3 мм. ОН определялись на каждой дорожке в четырех точках, расположенных вдоль оси фрезерования через равные интервалы. Положение коллиматора относительно плоскости образца определялось углом α , который варьировался от 0° (перпендикулярно плоскости образца) до 30° с шагом 5° . В результате измерений определялись компоненты тензора напряжений и проводилось сравнение величин измеренных ОН с их величиной при 0° .

Результаты

В результате проведения измерений выявлены предельные углы отклонения от нормали, при превышении которых получаем недостоверные данные. При $\alpha \leq 15^\circ$ разность измеренных величин ОН не превышает 15 %. При $\alpha > 15^\circ$ расхождение результатов измерений превышает 40 %. Также может наблюдаться изменение знака ОН.

Таким образом, при $\alpha < 15^\circ$ результаты измерения ОН могут быть использованы при разработке КТД и контроле ОН при проведении технологических процессов. Список литературы.

Буркин С. П., Шимов Г. В., Андрюкова Е. А. Остаточные напряжения в металлопродукции. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 248 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВА МЕТОДОМ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОПКИНСОНА

Гармашев А.Ю., Дегтярев А.А., Долгих С.М., Кленов А.И., Петров Д.В., Петухов Е.А., Сидоров К.С., Смирнов Е.Б., Шестириков М.А., Юсупов Д.Т.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,
д. 13, ул. Васильева, г. Снежинск, 456770, Россия,
e-mail: Trix90@mail.ru*

Цель работы – получение экспериментальных данных по динамическому сжатию конструкционных материалов, необходимых для совершенствования расчетных моделей их поведения при динамических нагрузках.

В общей проблеме прочности материалов и конструкций при динамическом нагружении особое место занимает проблема прочности и разрушения при однократном интенсивном нагружении типа удара, взрыва и др. Высокие скорости деформации или нагружения, высокие уровни напряжений, большие пластические деформации в преимущественно адиабатическом процессе деформирования, специфическое поведение материала при таком нагружении обуславливают сложность экспериментальных исследований, составляющих основу для разработки физических и математических моделей деформирования и разрушения материалов, применяемых для расчета элементов конструкций. Надежность и возможность сравнения результатов исследований определяется прежде всего научной обоснованностью постановки высокоскоростных испытаний материалов.

Одним из методов, имеющих ясные теоретические основы, высокую эффективность, универсальность и надежность полученных результатов является метод составных стержней Гопкинсона (ССГ) или метод Кольского. Данный метод позволяет исследовать динамические диаграммы сжатия и растяжения при скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 10^2\text{--}10^4 \text{ с}^{-1}$.

В работе приведены экспериментальные результаты опытов по динамическому сжатию меди и сплава меди с оловом с использованием метода ССГ. Определены диаграммы динамического сжатия, получены параметры модели деформирования для меди и ее сплава в форме Джонсона–Кука, широко применяющейся в динамических расчетах.

Полученные результаты используются при разработке реальных конструкций машин и механизмов.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА
В ВОЛНЕ РАЗГРУЗКИ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т В ДИАПАЗОНЕ
ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ 10–88 ГПа.**

Юсупов Д.Т., Сидоров К.С., Гармашев А.Ю., Смирнов Е.Б., Вильданов В.Г.,
Слободенюков В.М., Борщевский А.О., Ткачев О.В.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,
д. 13, ул. Васильева, г. Снежинск, 456770, Россия,
e-mail: d.t.usupov@mail.ru*

Цель работы – получение экспериментальных данных по ударной сжимаемости конструкционных материалов, необходимых для развития и совершенствования расчетных моделей поведения материалов и конструкций при воздействии на них ударных волн.

В работе измерены профили волн продольных напряжений σ_{xx} в нержавеющей стали указанной марки при начальной плотности $\rho_0 = 7,89 \text{ г/см}^3$. Измерения профилей волн напряжений выполнены с помощью симметричного удара, методом догоняющей волны разгрузки в плоских образцах с использованием встроенных в металл или буферный материал манганиновых датчиков.

По полученным профилям $\sigma_{xx}(t)$ определены скорости звука в ударно-нагруженной нержавеющей стали. Приведены экспериментальные данные по скоростям звука $C(\sigma_{xx}^1, \sigma_{xx})$ в зависимости от напряжения в ударной волне σ_{xx}^1 и в волне разгрузки σ_{xx} .

В результате серии экспериментов получены экспериментальные данные по скоростям звука в ударно-нагруженной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т в диапазоне исходных продольных напряжений значений ударного сжатия $10 \leq \sigma_{xx}^1 \leq 88 \text{ ГПа}$.

СОЗДАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЯ С НАПЫЛЯЕМЫМ ПОКРЫТИЕМ

Якимов А.К., Бутусова Е.Н.

ООО СК «АЭРОХОД», д. 37 Е, ул. Щербакова, Н.Новгород, 603003, Россия,
e-mail: anton_yakimov@mail.ru

При создании пневматических конструкций используются композиционные материалы, представляющие собой армирующую текстильную основу, покрытую эластомером для обеспечения герметичности и стойкости к абразивному износу. Одной из сфер применения технического текстиля с защитным покрытием является судостроение. Например, при производстве гибких ограждений для амфибийных судов на воздушной подушке используются материалы с капроновой текстильной основой и защитным покрытием на основе резины, ПВХ и полиуретана. Изготовление таких материалов происходит методом каландрирования эластомера на текстильную основу, в результате которого получается однородный по толщине материал. Применение данного метода рационально при производстве от нескольких сотен до нескольких тысяч погонных метров технической ткани.

Материалы, изготовленные методом каландрирования, хорошо зарекомендовали себя при производстве элементов, имеющих развертываемую и близкую к развертываемой форму. В то же время при производстве гибкого ограждения проектант часто сталкивается с проблемой изготовления элементов сложной неразвертываемой формы. Например, законцовки баллонетов ложкообразной формы, представляющие собой выпуклый конус. При производстве конструкций таких форм в силу малого межнитьевого сдвига материала с каландрированным покрытием используется метод условных разверток, позволяющий создавать конструкцию, близкую по форме к расчетной. Однако при этом неизбежно появление ряда запашных швов на поверхности изделия, являющихся наиболее слабым местом конструкции вследствие нарушения структуры материала на стыках. Прочность конструкции в местах швов обеспечивается не разрывными свойствами самого материала, а адгезионной характеристикой клеевого либо сварного шва, которая на порядок меньше. Кроме того, в районе кромки шва создается местное утолщение, которое при частых знакопеременных нагрузках приводит к перелому и разрушению материала вдоль шва.

При изготовлении элементов конструкции сложных неразвертываемых форм был разработан метод напыления эластомерного защитного покрытия на текстильную основу. Капроновый материал основы в чистом виде, без эластомерного покрытия, имеет большие межнитьевые сдвиговые деформации – до 20–30 % (в зависимости от способа плетения). Это свойство позволяет бесшовно расположить текстиль на болван-заготовке. Затем на капроновую ткань методом напыления наносится высокорреакционная композиция на основе простых полиуретанов. Время гелеобразования эластомера составляет 10–20 с, что позволяет нанести защитное покрытие равномерно без образования подтеков. Важно отметить, что вращение заготовки для компенсации гравитационного воздействия во время полимеризации полиуретана не требуется. В результате получается однородное герметичное эластомерное покрытие. В местах интенсивного износа материала, вследствие контакта с подстилающей поверхностью во время движения, возможно увеличение толщины защитного слоя.

Проведен ряд исследований данного материала по определению адгезионных свойств, прочности при разрыве и раздире, стойкости к низким температурам. По своим прочностным и конструктивным характеристикам элементы гибких ограждений, выполненные по технологии напыления эластомера на текстильную основу, не уступают изделиям из каландрированных материалов.

Следует отметить, что нарушение технологического процесса изготовления сильно влияет на качество выходного изделия. Прежде всего это связано с уменьшением адгезионной прочности между слоями эластомерного покрытия и прочности связи покрытия с текстильной основой.

СОЗДАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГРАНИЦ АЛМАЗ-МАТРИЦА И ЕЕ РОЛЬ В ПОВЫШЕНИИ СТОЙКОСТИ АЛМАЗНО-ТВЕРДОСПЛАВНЫХ КОМПОЗИТОВ

Яковлева С.П., Шарин П.П., Акимова М.П.

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
1, Октябрьская, Якутск, 677980, Россия,
e-mail: spyakovleva@yandex.ru, psharin1960@mail.ru, mar1ya_akimova@mail.ru*

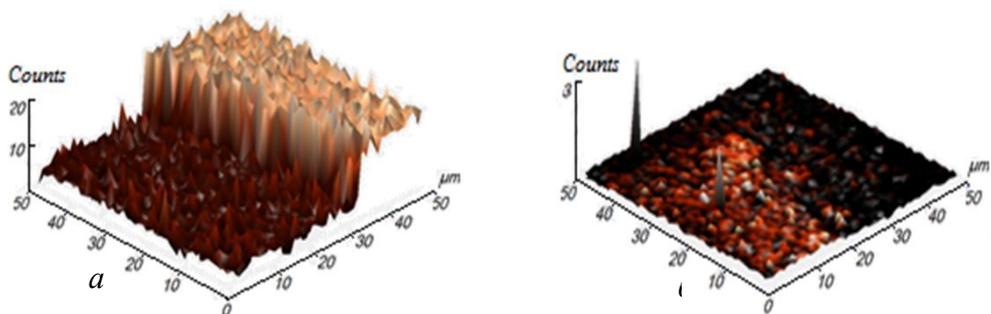
В промышленности (строительной, металлообрабатывающей, горнодобывающей и др.) широко применяется алмазный инструмент. Увеличение скоростей обработки, расширение номенклатуры обрабатываемых материалов, освоение минерально-сырьевых ресурсов криолитозоны определяют актуальность задач разработки новых подходов к синтезу высокостойких композиционных алмазных материалов (КАМ), используемых в рабочих элементах алмазного инструмента, включая буровой. Поскольку свойства композиционных материалов в наибольшей степени определяются свойствами интерфейса наполнитель-матрица, решение таких задач связано с направленным воздействием на условия формирования контактных зон и исследованием их особенностей. Для повышения прочности закрепления зерен алмаза применяют его предварительную металлизацию, способствующую повышению химической адгезии между алмазом и матрицей при последующем спекании. Но для КАМ с твердосплавной матрицей существуют ограничения по проведению металлизации, так как повторный нагрев металлизированного покрытия (МП) при высоких температурах спекания твердосплавных порошков приводит к его деструкции, усилению графитизации алмаза и ухудшению свойств инструмента.

Цель работы – исследование интерфейсных границ алмаз-матрица в КАМ, полученных при объединении металлизации и спекания в одноэтапной технологии, и основных факторов, определяющих стойкость алмазного инструмента в присутствии адгезионно-активного МП.

Для исследований были изготовлены образцы алмазных правящих карандашей по ГОСТ 607-80 с использованием порошков природного алмаза и сплава ВК-6. Для создания МП применяли два разных технологических приема: в первом случае на частицах алмаза (сырье марки XV «а-2» гр.) с помощью пластификатора закрепляли порошок хрома в виде оболочки, во втором – зерна алмаза (сырье марки XVI «а-1» гр.) оборачивали медной фольгой с предварительно засыпанным порошком хрома. Далее образцы спекали по ранее предложенной технологии, обеспечивающей саморегулируемую дозировку количества пропитывающего металла (меди) [1]; температурная циклограмма соответствовала применяемой в серийном производстве карандашей. Для проведения сравнительных испытаний одновременно с опытными карандашами были получены однотипные контрольные образцы карандашей без МП.

Исследования опытных образцов с применением методов РЭМ, рентгеноструктурного фазового анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния, атомно-силовой микроскопии подтвердили формирование и сохранение на алмазных частицах МП островкового типа и плотное заполнение имеющихся промежутков микро-, нанотолщинными прослойками металла-инфильтрата. Свободный углерод (графит) практически отсутствует: на участке интерфейса алмаз-матрица (рисунок) с четко обрисованной границей алмаза почти нет рамановского отклика на G и G1 линии графита.

Сравнительные испытания подтвердили эффективность разработанной технологии: удельная производительность опытных карандашей при правке шлифовального круга из зеленого карбида кремния превысила аналогичный показатель контрольных карандашей на $\approx 39\%$ (металлизирование без фольги) и на $\approx 45\%$ (металлизирование с фольгой).



Трехмерные карты рамановских спектров на линии D-моды алмаза (а) и на G, G1 полосах графита (б) границы алмаз-матрица опытных правящих карандашей (металлизация с фольгой)

Представлены результаты исследований фундаментально-прикладных вопросов создания алмазно-твердосплавных инструментов для работы при высоких динамических и температурных нагрузках. Предложены и реализованы новые технологические подходы к синтезу КАМ, обеспечившие монолитность и прочность интерфейса алмаз-матрица за счет многоуровневой организации высокоструктурированных морфологических элементов при минимальной графитизации; улучшение алмазоудержания повысило эксплуатационные свойства опытных алмазных карандашей на 39–45 %.

Литература

Структурная организация высокоизносостойких алмазосодержащих композитов на основе твердосплавных порошков, полученных методом спекания с пропиткой медью / П. П. Шарин, С. П. Яковлева, В. Е. Гоголев, М. И. Васильева // Перспективные материалы. – 2015. – № 6. – С. 66–77.

ОСОБЕННОСТИ РОСТА ТРЕЩИН В НЕКОТОРЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Якупов Р.Р.¹, Зайцев Д.В.¹, Калачев В.А.¹, Кочанов А.Н.²,
Костандов Ю.А.³, Панфилов П.Е.¹

¹Институт естественных наук, УрФУ, 620083 Россия, Екатеринбург пр. Ленина, 51,
e-mail: yakupov.ratmir@bk.ru,

²Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, Москва

³Крымский федеральный университет, Симферополь

Минералы или горные породы это природные соединения, которые появились в результате различных физико-химических процессов, совершающихся в земной коре. Многие минералы получили практическое применение в промышленности. Механические свойства минералов изменяются в широком диапазоне и зависят от их микроструктуры. Микроструктура горных пород неоднородна и в большинстве случаев представляет собой дисперсионную кристаллическую фазу растворенную в минеральной среде. Кристаллическая структура минеральной фазы очень разнообразна. Изучение процесса разрушения горных пород позволит понять механизмы роста трещины в сложных многоуровневых структурах.

Цель настоящего исследования – изучение роста трещин в некоторых горных породах на разных масштабных уровнях и типах нагружения.

В качестве модельных материалов для исследования роста трещин были выбраны следующие горные породы: гранит, углистый кварцит, серпентинит, искусственный песчаник и каменный уголь (антрацит). Образцы для механических испытаний изготавливали путем высверливания полым алмазным сверлом цилиндрических заготовок из массивного куска горной породы в водной среде. Далее торцевые части заготовок приполировывали на алмазном диске (при водном охлаждении) до достижения плоскопараллельности и нужного размера. Окончательно образцы обладали цилиндрической формой диаметром 6 мм и высотой 3 мм. Для проведения механических испытаний были выбраны две деформационные схемы: одноосное сжатие и не прямое растяжение / диаметрально сжатие. Для каждого типа испытаний было изготовлено 10 образцов из материалов каждой группы. Механические испытания проводили при комнатной температуре на воздухе на разрывной машине Shimadzu AG-50KN XD (скорость перемещения траверсы 0,1 мм/мин). Дополнительно для изучения характера роста трещины были изготовлены тонкие (0,01мм) образцы в которых появлялись трещины при их утонении. Трещины на поверхности утоненных образцов и образцов после нагружения изучали при помощи макросъемки на фотоаппарате (Cannon D60 с Canon EF-S 60 mmf/2.8 Macro USM и Canon Macrolite MT-24 EX) и микроскопах (металлографический микроскоп МИМ-8М (на отражение) и биологический микроскоп МБИ-6 (на просвет)) и электронной микроскопии (сканирующий микроскоп JSM-6390 LV и JSM-6490).

Характер хода деформационных кривых образцов, изготовленных из модельных материалов, был подобен. Зависимость деформации от напряжения была линейной, а разрушение образца происходило сразу же по достижению максимального напряжения. Образцы при одноосном сжатии разрушались на мелкие частицы, тогда как при растяжении, разрушение образца происходило за счет роста одиночной трещины между точками контакта образца с пуансонами испытательной машины. Такое поведение материала при нагружении и его дальнейшем разрушении характерно для хрупких материалов. Поэтому можно заключить, что под действием растягивающей и сжимающей нагрузки образцы горных пород ведут себя как хрупкий материал.

Исследование трещин на макроскопическом уровне показало, что траектория движения магистральной трещины определяется не только геометрией приложения нагрузки, но и строем материала. Например, в случае гранита наблюдалось отклонение роста трещины при появлении в ее фронте крупных кристаллитов. Наоборот, в других образцах трещина была прямолинейная и наблюдалось, что при прохождении трещины сквозь включение она не изменяла своей траектории роста. Также были выявлены случаи, когда характер роста трещины можно было охарактеризовать, как вязкое. В частности у серпентинита наблюдались неровные края трещины, большой угол при вершине и образование сателлитных трещин в ее фронте. Исследование при помощи больших увеличений (СЭМ) показало, что такое поведение трещины характерно для мелкозернистых материалов, когда траектория трещины проходит по границам зерен.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ВЕКТОРНЫХ СВОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЭНЕРГИИ ДЕФЕКТА УПАКОВКИ

Янц А.Ю., Трусов П.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990,
пр. Комсомольский, 29, Пермь, Россия,*

Ключевые слова: поликристалл, большие градиенты перемещений, сложное нагружение, векторные свойства, энергия дефекта упаковки

Известно, что пластическое деформирование кристаллов реализуется преимущественно путем движения дислокаций по кристаллографическим плоскостям, при этом основной вклад в неупругое деформирование вносит движение краевых дислокаций [1–3]. В связи с этим упрочнение (повышение критических напряжений сдвига на системах скольжения кристалла) связывают с образованием препятствий скольжению дислокаций, к которым можно отнести различные дефекты кристаллической решетки (примесные атомы, включения вторичных фаз, границы зерен и др.). При неупругом деформировании дислокации могут вступать друг с другом в реакции, образуя новые дефекты кристаллической решетки, являющиеся препятствиями для движения дислокаций, и, как следствие, оказывающие влияние на процесс неупругого деформирования. Реализация ряда реакций между дислокациями определяется величиной энергии дефекта упаковки (ЭДУ), от которой зависит величина расщепления полных дислокаций на частичные [1, 2]. В свою очередь частичные дислокации вступают в реакцию с образованием дислокаций, не лежащих в плоскостях легкого скольжения, которые являются мощными препятствиями на пути движения остальных дислокаций. Стоит отметить, что для кристаллов с низкой ЭДУ характерно большее количество возможных реакций между расщепленными дислокациями, приводящих к образованию прочных барьеров. На основе изложенных теоретических данных был использован закон упрочнения [4], в основе которого лежит матрица A , значения коэффициентов A_{ij} которой определяют степень влияния на упрочнения систем скольжения с номерами i и j .

В настоящей работе объектом исследования является поликристалл, состоящий из хаотично ориентированных кристаллитов, основными препятствиями считаются дефекты кристаллической решетки, образуемые при взаимодействии краевых дислокаций, влияние примесных атомов и включений других фаз не рассматривается. Границы кристаллитов также являются препятствиями для движения краевых дислокаций, для описания упрочнения за счет границ использована модель, представленная в [5]. Для возможности корректного описания геометрической нелинейности, неизбежно возникающей при больших градиентах перемещений, использовалось разложение движения кристаллита на квазитвердое и деформационное. Квазитвердое движение связывается с одним кристаллографическим направлением и плоскостью.

В качестве модельных материалов были выбраны поликристаллы с существенно различающейся ЭДУ: Cu (40 эрг/см^2) и Al (200 эрг/см^2) [6]. Траекторией нагружения была выбрана двухзвенная ломаная: два последовательных сдвига в плоскостях XOY и XOZ. Запаздывание векторных свойств оценивалось в терминах теории упругопластических процессов А.А. Ильюшина. В результате работы были выявлены качественные зависимости между запаздыванием векторных свойств при сложном нагружении от величины ЭДУ: более высокие значения ЭДУ соответствуют меньшему следу запаздывания векторных свойств, что является следствием меньшего упрочнения на стадии деформирования непосредственно после излома траектории деформации, где начинают активизироваться новые системы скольжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект №9.7434.2017/8.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-01-00379).

Литература

1. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. – М. : Атомиздат, 1972. – 600 с.
2. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М. : Мир, 1972. – 408 с.
3. Фридель Ж. Дислокации. – М. : Мир, 1967. – 644 с.
4. Franciosi P., Verweiller M., Zaoui A. Latent hardening in copper and aluminium single crystals // Acta Metall. – 1980. – Vol. 28. – P. 273–283.
5. Кондратьев Н. С., Трусев П. В. Моделирование неупругого деформирования поликристаллических материалов с учетом упрочнения за счет границ кристаллитов // Вестник Пермского университета. Сер. Физика. – 2012. – № 4. – С. 92–100.
6. Impurity effect of Mg on the generalized planar fault energy of Al / D. Zhao, O. M. Løvvik, K. Marthinsen, Y. Li // J. Mater. Sci. – 2016. – Vol. 51. – P. 6552–6568.

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С УЧЕТОМ ИЕРАРХИИ СТРУКТУР

Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Люкшин П.А.,
Матолыгина Н.Ю., Панин С.В., Реутов Ю.А.

*ИФПМ СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия,
e-mail: svetlanab7@yandex.ru*

Ранее авторами предложено при анализе параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) наполненных полимерных композиций выделять 4 уровня, отличающихся учетом разных структурных элементов в материале и масштабами [1].

На первом уровне материал рассматривается как однородный, все свойства его трактуются как эффективные. На втором уровне анализируется ограниченный объем материала (меняется масштаб, как и при каждом переходе на следующий уровень), отражающий его свойства (представительный объем), но принимается во внимание наличие армирующих включений. На следующем уровне размер анализируемого объема уменьшается, тогда становится возможным учет межфазных слоев на границах между матрицей и включениями. Если включения сами по себе имеют различные размеры, в этом случае становится возможным учет их в явном виде. Наконец, при следующем изменении масштаба можно учесть неоднородность полимерной матрицы, тогда как на всех предыдущих уровнях она принималась однородной.

Первый уровень предполагает анализ параметров НДС методами классической механики деформируемого твердого тела, одной из основных гипотез которой является однородность материала. Примеры решения задач на втором и третьем уровнях приведены, в частности, в работах авторов (например, [2, 3]).

Относительно мало исследовано влияние структуры полимера, в частности, сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), на его механические свойства. Для подавляющего числа полимеров характерно наличие двух состояний – в виде кристаллитов и в виде аморфной фазы. Полимерный материал можно рассматривать как двухкомпонентную смесь аморфной и кристаллической структур, удельная доля которых определяется степенью кристаллизации. Надмолекулярная структура высокомолекулярной матрицы СВМПЭ – ламеллярная или сферолитная – определяется режимами компрессионного спекания композитов (температура и давление).

В работе в расчетной области явным образом выделены зоны с кристаллитными и аморфными структурами, а анализ этой области позволяет получить детальные распределения параметров НДС.

Расчеты показывают, что экстремальные деформации и напряжения с увеличением степени кристалличности уменьшаются. С повышением степени кристалличности более прочная кристаллическая фаза играет роль своего рода силового каркаса, в результате уменьшаются экстремальные значения деформаций при идентичном уровне нагрузки. В большей мере это проявляется при повышенных температурах, когда прочностные свойства аморфной фазы деградируют быстрее, чем кристаллитной.

Учет структуры матрицы при моделировании и конструировании наполненных композитов дает дополнительные возможности для управления эффективными свойствами материалов.

Работа выполнена в рамках проектов: 1) ПФИ ГАН на 2013–2020 гг. по направлению фундаментальных исследований 23 тема 23.1.3. (Регистрационный номер НИОКР АААА-А16-116122010041-9); 2) РФФИ №16-48-70192_р_а.

Литература

1. S.V. Panin, B.A. Lyukshin, P.A. Lyukshin, L.A. Kornienko, S.A. Bochkareva, N.Yu. Grishaeva, V.O.Alexenko. Multiscale design of filled polymeric composites // International symposium on heterogeneous material mechanics (ISHMM-2016), 8–10 June, 2016, Chongqing, Chine, с. 43.
2. Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Бочкарева С.А., Люкшин П.А, Панин С.В., Реутов Ю.А. Мультимасштабное моделирование и компьютерное конструирование наполненных полимерных композиций // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. 20–24 августа 2015г., Казань. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2015, С. 1071–1073.
3. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 311 с.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОМБИНИРОВАННЫХ ПАРАХ ТРЕНИЯ WC-(FE-MN-C)-СТАЛЬ

Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Утяганова В.Р., Гнусов С.Ф.

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
(ИФПМ СО РАН), 2/4, просп. Академический, г. Томск, 634055, Россия,
e-mail: savnick@ispms.tsc.ru, sevir@ispms.tsc.ru, filaret_2012@mail.ru, gnusov@rambler.ru*

Развитие современной промышленности связано с необходимостью создания перспективных износостойких композиционных материалов и новых методов их поверхностной обработки для тяжелонагруженных пар трения [1, 2]. Физико-химические аспекты контактного взаимодействия в комбинированных парах трения из разнородных материалов в условиях тяжело-нагруженных пар трения – малоисследованная тема.

Цель настоящей работы – исследование физико-химических аспектов механизмов износа композитов на основе тугоплавких карбидов со связкой из высокомарганцовистой стали при высокоскоростном трении.

В качестве образцов в работе были использованы композиционные материалы WC – (Fe-Mn-C) с содержанием 80 мас. % упрочняющей фазы (WC). Содержание марганца в связующей фазе составляло 4 и 20 мас. %, а содержание углерода составляло 0,8 мас. %. Такое количество марганца в композитах было выбрано для обеспечения заметной разницы в фазовом составе связки и дало возможность получить как стабильный аустенит, так и двухфазную ($\gamma + \alpha$) связку.

Показано, что при трении композитов WC-(Fe-Mn-C) по стальному диску в диапазоне скоростей от 1 до 37 м/с и давлении 5 МПа на их поверхности трения происходит формирование фрагментированной структуры, состоящей из смеси дисперсных частиц карбида вольфрама, связки композита и сложного оксида на основе $FeWO_4$, который обуславливает эффект самосмазывания при высоких скоростях скольжения.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ ПО СТАЛИ КОМПОЗИТА WC-СТАЛЬ ГАДФИЛЬДА

Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Утяганова В.Р., Гнусов С.Ф.

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
(ИФПМ СО РАН), 2/4, просп. Академический, г. Томск, 634055, Россия,
e-mail: savnick@ispms.tsc.ru, sevir@ispms.tsc.ru, filaret_2012@mail.ru, gnusov@rambler.ru*

Композиты WC-сталь Гадфильда является перспективными материалами для областей техники, которые связаны с применением высоких скоростей и нагрузок благодаря своей высокой износостойкости в экстремальных условиях. Известно, что структурно-фазовый состав трибослоев сплавов и композитов во многом определяется приложенным при трении давлением, однако подобных исследований для композитов WC-сталь Гадфильда проведено не было.

Цель работы – изучение триботехнических характеристик и структурно-фазовых изменений поверхности композиционного материала WC-сталь 110Г13 после трения в широком диапазоне скоростей (от 10 до 37 м/с) скольжения при двух прикладываемых давлениях (2 и 4 МПа) при сухом трении по стальному контртелу.

Показано, что при трении композита WC-сталь Гадфильда в паре со сталью при скоростях скольжения от 10 до 37 м/с и давлениях 2 и 4 МПа происходит формирование трибослоев, толщина которых составляет 2–3 мкм независимо от приложенного давления. При этом после скоростей скольжения в диапазоне от 10 до 20 м/с химический состав трибослоев не отличается от состава исходного композита, а после скоростей скольжения выше 20 м/с трибослои обогащены железом и содержат оксид $FeWO_4$.

Было обнаружено, что в процессе трения с приложенным давлением 4 МПа за счет роста температуры происходит интенсивная пластическая деформация поверхности композита с формированием «козырьков», на которых толщина трибослоев существенно выше, чем в центре образца и при скорости 37 м/с и достигает 200 мкм.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ КЕРАМИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ И ПАРАМЕТРАМИ ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР

Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Утяганова В.Р., Саблина Т.Ю., Гнусов С.Ф.

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), 2/4, просп. Академический, г. Томск, 634055, Россия,
e-mail: savnick@ispms.tsc.ru, sevir@ispms.tsc.ru, filaret_2012@mail.ru,
sabat@ispms.tsc.ru, gnusov@rambler.ru*

Быстрое развитие машиностроения выдвигает задачи создания новых композиционных материалов, обладающих повышенной износостойкостью при высоких скоростях и больших нагрузках. Данных о трибологическом поведении и структурных изменениях поверхности керамических и металлокерамических композитов при высоких скоростях скольжения (выше 1...2 м/с) к настоящему времени недостаточно.

Цель работы – взаимосвязи между износостойкостью керамических и металлокерамических композитов и формируемыми структурами на поверхности трения при высокоскоростном скольжении по стали.

Исходя из структурных особенностей, изученных в настоящей работе композитов, можно утверждать, что способность структуры материалов формировать на поверхности трения тонкие, устойчивые к фрагментации, текстурированные трибослои, определяет их повышенную износостойкость при высоких скоростях скольжения.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Babich D.S., 278
 Balokhonov R.R., 121
 Belyakova E. A., 247
 Borisova R.V., 47
 Boykova A.V., 248, 324, 372
 Vyakov A.V., 77
 Смолин А.Ю., 363
 Emelianova E.S., 121
 Eremin A.V., 77
 Filippov A.V., 210
 Filyakov A.D., 248, 324, 372
 Golubev V.I., 232
 Gromov V.E., 248, 324, 372
 Kolubaev E.A., 210
 Koryakina N.S., 47
 Lychagin D.V., 210
 Maksimov P.V., 278
 Malakhov A.V., 225
 Marushchak P.O., 77
 Medison V.V., 232
 Moiseenko D.D., 278
 Moskovsky S.V., 248
 Moskvina R. N., 247
 Nikiforov L.A., 47
 Okhlopkova A.A., 47
 Okhlopkova T.A., 47
 Panin S.V., 77, 278
 Panin V.E., 278
 Pegashkin V.F., 232
 Polilov A.N., 225
 Rogachev S.O., 127
 Romanov D.A., 248, 324, 372
 Romanova V.A., 121
 Schmauder S., 278
 Sergeev M.V., 121
 Sizova O.V., 210
 Sosnin K. V., 324
 Sosnin K.V., 372
 Spiridonov A.M., 47
 Tian X., 225
 Tsvetkov N.A., 210
 Vlasov I.V., 77
 Ysova A.V., 248, 324, 372
 Yurova V. S., 247
 Zemlyakova N.V., 127
 Абабков В.Н., 109
 Авруцкий В.В., 3
 Агапитова О.Ю., 5, 188
 Адамов А.А., 7, 402
 Айдинян Н.В., 163
 Акимова А.В., 8, 237
 Акимова М.П., 453
 Аккузин С.А., 201
 Алексенко В.О., 10, 48
 Алеутдинова М.И., 11, 13, 15
Аммосов А.П., 17
 Аммосов Г.С., 17
 Аммосова О.А., 18, 401
 Андреев А.Н., 237
 Андреященко В.А., 19
 Андрианов И.В., 31
 Андриенко Г.В., 390
 Андросович И.В., 3
 Аникеев Н.А., 102
 Аношкин А.Н., 285, 290
 Анучина Е.А., 21
 Апкарьян А.С., 88, 321
 Аргунова А.Г., 90
 Арляпов А.Ю., 46
 Атласов Р.А., 265
 Ахметов А.Ж., 23
 Бабайлов Н.А., 24, 26
 Бадамшин А.Г., 85
 Бадиков К.А., 327, 340
 Бадриев И.Б., 60, 220, 361
 Балафендиева И.С., 27, 28
 Балина О.В., 29, 261
 Балохонов Р.Р., 122, 348
 Банников М.В., 30, 33
 Бараз В.Р., 31
 Баранникова С.А., 198
 Бартоломей М.Л., 89
 Батуев С.П., 32
 Батухтина Е.Е., 122
 Башарова А.Ф., 320
 Баяндин Ю.В., 326
 Бекренев Н.В., 132, 134
 Белобородов В.А., 82, 151
 Белов А.С., 437
 Бельтюков Н.Л., 280
 Беляев А.К., 34, 299
 Беляев А.Ю., 246
 Беляев Ю.Н., 35
 Беляева Н.А., 36
 Бердник О.Б., 37, 426
 Бережной Д.В., 27, 28
 Березин И.М., 38, 187
 Берестова С.А., 242, 243
 Билалов Д.Х., 40
 Блинов А.В., 41

Богачев И.В., 43
 Богданов А.С., 44
 Богданов Д.Г., 44
 Бознак А.О., 46
 Болонина А.М., 411
 Большаков А.М., 55, 126, 138, 308
 Борисова А.Д., 221
 Боровик С.Ю., 41
 Борцова Я.И., 335
 Борщевский А.О., 440, 451
 Ботвин Г.В., 108
 Бочкарева А.В., 207
 Бочкарева С.А., 48, 211, 274, 276, 458
 Брусенцева Т.А., 49
 Бублик В.В., 51
 Булдакова И.В., 52
 Бурмашева Н.В., 53, 54
 Бурнашев А.В., 55
 Буров С.В., 216
 Бушлаева И.И., 56
 Буслович Д.Г., 57
 Бутманов Д.Д., 33
 Бутусова Е.Н., 58, 452
 Буякова С.П., 101, 339
 Буянов В.Ю., 60
 Бывальцев С.В., 5
 Бызов А.В., 62
 Быков А.А., 442
 Быкова Т.М., 64
 Бычков Н.Г., 3
 Валентюкевич Н.Н., 10
 Вальтер Ф., 239
 Варданян Э.Л., 92
 Варфоломеев Д.А., 440
 Василенко О.Н., 62
 Васильев С.В., 66, 325
 Васильева М.А., 67
 Ватульян А.О., 43, 120, 262, 263
 Ведерникова А.И., 68
 Веремейчик А.И., 69
 Веретенникова И.А., 244, 360
 Верещагин В.И., 142
 Веселов И.Н., 70, 314
 Веселова В.Е., 86
 Вильданов В.Г., 451
 Вильдеман В.Э., 137, 374, 375, 376, 403, 413
 Витязь П.А., 421
 Вичужанин Д.И., 71, 73, 187, 318, 345
 Владимиров А.П., 74
 Власов И.В., 75
 Власова Д.В., 78
 Волегов П.С., 79
 Волков В.П., 155
 Волков С.С., 80
 Волкова Е.Г., 216, 352, 431
 Волкова Л.В., 52
 Вольфсон С.И., 411
 Воробьев О.В., 338
 Воронин С.В., 432
 Воронков А.А., 448
 Воронцов А.В., 82, 83, 150
 Воронцов М.С., 163, 164
 Вшивков А.Н., 84, 279, 291
 Габов И.П., 36
 Гаврилов Н.В., 218
 Галеев Р.М., 349
 Галлямова Р.Ф., 85
 Галышев С.Н., 85, 92
 Гаркушин Г.В., 326
 Гармашев А.Ю., 450, 451
 Герасимов А.И., 108
 Герасимов О.В., 338
 Гибзун М.С., 366
 Гладкина Н.Н., 354
 Гладковский С.В., 86, 87, 155, 349
 Глазкова Е.А., 88, 321
 Глот И.О., 89, 442
 Гнюсов С.Ф., 460, 461, 462
 Гоголева О.В., 90
 Головин Д.Ю., 409
 Головин Ю.И., 409
 Гомзин А.И., 92
 Гончар А.В., 93, 167, 168, 195
 Горбатенко В.В., 109
 Горкунов Э.С., 95, 294, 314, 330
 Горулева Л.С., 95
 Горшков А.В., 96, 97
 Горячева И.Г., 98
 Грибов Д.С., 99
 Григорьев М.В., 101, 339
 Григорьева Л.А., 354
 Гришаева Н.Ю., 48, 211, 274, 276, 458
 Грищенко А.И., 34
 Громов В.Е., 21
 Губин В.В., 102
 Гуляев В.П., 304
 Гумеров А.К., 350
 Гусев Г.Н., 104, 105
 Давыдова Н.А., 106
 Данзанова Е.В., 108
 Данилов В.И., 109
 Данилов С.В., 110, 204
 Двойников Д.А., 86, 87, 349

Дегтярев А.А., 450
Денисевич Д.С., 327
Денисенко Д.В., 111
Дерюгин Е.Е., 258
Дмитриев А.В., 82, 148
Дмитриев А.И., 46, 113
Дмитриев С.Ф., 227
Докичев В.А., 85
Долгих В.С., 114
Долгих С.М., 450
Донцов Ю.В., 57
Доронин С.В., 116, 416
Дремов В.В., 440
Дроздов В.О., 117, 118, 119
Друкаренко Н.А., 190
Дубенко Е.М., 306
Дударев В.В., 120
Дьяченко Д.И., 102
Егоров А.В., 333, 335
Елисеев А.А., 417
Елшина Л.А., 73
Емельянов И.Г., 189, 240
Емельянова Е.С., 122, 348
Еникеев Ф.У., 185
Епин В.В., 427, 447
Еремин А.В., 75
Еремин М.О., 123
Еремина Г.М., 124
Ермаков Д.А., 290
Жармухамбетова А.М., 267
Желнин М.С., 180
Жилин С.Г., 300
Жихарева И.Г., 111
Жуков Л.Л., 148
Загуляев Д.В., 21
Задворкин С.М., 95, 294, 314
Заикина А.А., 125
Зайцев Д.В., 281, 455
Зайцев Н.Л., 351
Залазинский А.Г., 5, 38, 188, 400
Занг Ц., 146
Захаров А.П., 84
Захарова М.И., 126
Зингерман К.М., 128
Зинин А.В., 3, 129, 135
Злобина И.В., 132, 134
Зольников К.П., 186
Зубань В.Н., 135
Зубова Е.М., 137, 406
Зуев Л.Б., 198, 302
Иванов А.М., 163
Иванов А.Н., 149, 152
Иванов А.Р., 138
Иванова А.И., 164
Иванова И.К., 139, 342
Иванова Л.Р., 10, 57
Иванова П.В., 163
Игнатов М.Н., 142
Игнатова А.М., 142
Игумнов А.С., 244
Изюмова А. Ю., 291
Изюмова А.Ю., 84
Ильиных А.В., 143, 209
Иляхинский А.В., 322, 323
Иорданский А.Л., 270
Исмаилов Г.М., 144
Ишков А.В., 227
Кабанова А.В., 146
Казаков А.Л., 373
Казаков К.Е., 147
Казанцев А.В., 166
Калачев В.А., 281, 455
Калашников К.Н., 83, 148, 149, 150, 151, 153
Калашникова Т.А., 148, 151, 152, 153, 154, 414, 436
Каманцев И.С., 87, 155, 190
Каменецких А.С., 246
Каменских А.А., 156, 410
Канюков С.И., 158, 159
Каплунов И.А., 128, 160, 161, 162, 163, 164
Карманов В.В., 449
Карпенко К.И., 254
Карпов Е.В., 117
Карпова С.Г., 270, 408
Картамышев А.И., 224
Кастеров А.М., 231
Катасонов А.О., 227
Каюмов Р.А., 422
Келлер И.Э., 165, 166
Кириков С.В., 37, 426
Кленов А.И., 450
Клименко С.А., 421
Клюшников В.А., 93, 167, 168
Коган Л.Х., 330
Козлов Е.А., 440
Коковихин Е.А., 155
Кокуров А.М., 170, 392
Колесников А.И., 163, 164
Колесников В.И., 233, 254
Колмаков А.Г., 421
Колобов Ю.Р., 224
Колубаев А.В., 125
Колубаев Е.А., 125, 417

Комаров О.Н., 300
 Кондаков А.С., 401
 Кондратьев И.М., 171
 Кондратьев Н.С., 173, 214
 Коновалекно И.С., 175
 Коноваленко И.С., 183, 184
 Коновалов А.В., 158, 159, 419
 Коновалов Д.А., 177, 360
 Коновалов С.В., 432
 Копейна А.В., 71
 Копытов Н.П., 242, 243
 Корзникова Г.Ф., 349
 Коркин А.В., 386
 Корниевский А.С., 259
 Корниенко Л.А., 10, 57
 Корнилова З.Г., 17
 Коробов Ю.С., 366
 Королева Л.Ф., 178
 Коротин С.В., 404
 Корх М.К., 320
 Корчуганов А.В., 179, 186
 Корякина В.В., 139, 342
 Костандов Ю.А., 281, 455
 Костин В.Н., 62, 346
 Костина А.А., 180, 280
 Кочанов А.Н., 281, 455
 Кошелева Н.А., 181
 Краснов М.Л., 110
 Красновейкин В.А., 183, 184, 364
 Кривина Л.А., 37, 426
 Круглов А.А., 185
 Крыжевич Д.С., 186
 Крымский М.И., 162
 Крючков Д.И., 187, 188, 400
 Кузнецов А.В., 87, 189, 190
 Кузнецов П.А., 373
 Кузоватова О.И., 191
 Кузьмина Е.С., 398
 Кульков А.С., 23, 364
 Кульков С.Н., 101, 122, 339
 Курашкин К.В., 93, 167, 195
 Курмоярцева К.А., 196
 Кутенева С.В., 86, 87
 Кучко Д.П., 440
 Лаукканен С., 354
 Лежнин Н.В., 218, 431
 Лепендин А.А., 335
 Лернер М.И., 321
 Лехов О.С., 40
 Ли Ю.В., 198
 Либерман А.Е., 199
 Липницкий А.Г., 224
 Литовченко И.Ю., 201
 Лобанов А.В., 270, 408
 Лобанов Д.С., 202
 Лобанов М.Л., 110, 204
 Лобачев А.М., 34
 Логинов Ю.Н., 24, 378
 Ложкина Е.А., 437
 Лукин Е.С., 205
 Лунев А.Г., 207, 256
 Луценко И.С., 179
 Лыкова А.В., 209
 Люкшин Б.А., 48, 211, 274, 276, 458
 Люкшин П.А., 48, 211, 274, 276, 458
 Ляхова М.Б., 163
 Майсурадзе М.В., 213
 Макаревич Е.С., 214
 Макаров А.В., 106, 216, 218, 330, 331, 345, 352, 366, 385, 431
 Макаров М.В., 60, 220, 361
 Макаров П.В., 287, 364
 Макаров С.В., 44
 Макарова Е.А., 204
 Маккавеев А.В., 104, 105
 Максименко А.А., 221
 Максименко В.Н., 224
 Малашенко В.В., 226
 Маликов А.Г., 117, 119
 Маликов В.Н., 227
 Малыгина И.Ю., 64, 106, 216, 313, 330, 366, 385
 Мальцева А.Н., 70, 204
 Малюгина С.Н., 440
 Маркова М.А., 229
 Мартынов С.А., 231
 Марьин Б.Н., 305
 Маскалюнайта О.Е., 252
 Матвеев В.П., 105
 Матольгина Н.Ю., 48, 211, 274, 276, 458
 Месенцова И.С., 117
 Мигаль Ю.Ф., 233
 Микушина В.А., 235, 364
 Милащенко А.И., 237
 Минаков А.А., 239
 Минеев В.Е., 144
 Миронов В.А., 8, 237
 Миронов В.И., 189, 190, 240, 241
 Миронов Ю.П., 258
 Миронова Т.Ф., 237
 Мисюра Н.Е., 242, 243
 Митюшов Е.А., 242, 243
 Михалев А.В., 40
 Мичуров Н.С., 244

Мишакин В.В., 93, 167, 168
 Мкртычев О.В., 245
 Молчанов С.В., 164
 Морозов И.А., 246
 Мужецкая С.Ю., 88
 Муйземнек О.Ю., 158, 159
 Муравьев В.В., 52, 320
 Муравьева О.В., 320
 Мурадымов Р.В., 73
 Муратов К.Р., 249
 Мусин И.Н., 411
 Мусин Ф.Ф., 85, 92
 Мухин В.В., 252
 Мухутдинов Ф.И., 41
 Мушников А.Н., 298
 Мясников Ф.В., 254
 Мясникова М.В., 357
 Надежкин М.В., 207, 256
 Назаров А.Ю., 92
 Наймарк О.Б., 30, 257, 268, 326, 367
 Наркевич Н.А., 258
 Наседкин А.В., 259, 260
 Наседкина А.А., 260
 Нассонов В.В., 29, 261
 Насыров В.Ф., 424
 Неганов Д.А., 428
 Недин Р.Д., 120
 Неласов И.В., 224
 Нерадовский Д.Ф., 249
 Нестеренко А.В., 38, 71, 73, 187
 Нестеров С.А., 262
 Нестеров С.А., 263
 Нефедова О.А., 264
 Никитина Е.А., 322, 323
 Никифорова С.М., 446
 Николаева М.В., 265
 Николин Ю.В., 313
 Никонов А.Ю., 113, 267
 Новиков В.Ф., 249
 Новиков Е.С., 254
 Оборин В.А., 30, 268
 Овдина Д.С., 437
 Овчинников Н.П., 304
 Огорелков Д.А., 241
 Одинцев И.Н., 269, 293
 Озерных В.С., 79
 Ольхов А.А., 270, 408
 Оришич А.М., 117, 119
 Осинцева А.Л., 218, 330, 352, 431
 Осипова В.А., 360
 Осокин В.М., 285
 Останина Т.В., 395
 Остапович К.В., 271
 Ошмарин Д.А., 272
 Павленко А.В., 440
 Павлов М.С., 144
 Павлов Н.А., 117
 Паймушин В.Н., 220, 422
 Палкин Д.Д., 273
 Панин В.Е., 358
 Панин С.В., 10, 48, 57, 75, 211, 274, 276, 458
 Панов И.Л., 48
 Пантелеев И.А., 279, 280
 Панфилов Г.П., 281
 Панфилов П.Е., 146, 281, 455
 Паньков А.А., 283, 284
 Паньков И.Л., 280
 Партин А.С., 419
 Пастухов В.И., 110, 204
 Пеленев К.А., 285, 448
 Первиков А.В., 88, 321
 Первухина Д.Н., 24
 Перфильева Н.В., 221
 Перышкин А.Ю., 287
 Пестов А.В., 360
 Петров Д.В., 450
 Петров К.В., 320
 Петрова А.Н., 312
 Петрова Н.Н., 252, 398
 Петрова П.Н., 90, 229
 Петровцев А.В., 440
 Петухов Д.С., 165, 166
 Петухов Е.А., 450
 Петухова Е.С., 288
 Писарев П.В., 290
 Платов С.И., 110
 Платунов А.В., 52
 Плевков В.С., 32
 Плехов О.А., 68, 84, 180, 291, 312
 Плотников В.А., 44
 Плотников Г.Н., 446
 Плохих А.И., 78, 239, 292, 295
 Плугатарь Т.П., 293
 Поволоцкая А.М., 294
 Поликевич К.Б., 295
 Полилов А.Н., 393
 Поляков А.П., 296, 297, 298
 Поляков В.В., 333, 335
 Поляков П.А., 297, 298
 Полянский В.А., 34, 299
 Полянский Л.И., 24
 Попов А.А., 270
 Попов А.В., 300

Попов Ф.С., 301
 Попова Е.А., 302
 Порошин В.Б., 303
 Портнягина В.В., 304
 Потянихин Д.А., 305, 306
 Почивалов Ю.И., 13, 75, 358
 Предеин В.В., 300
 Привалова В.В., 307, 309
 Прокопьев Л.А., 308
 Просвиряков Е.Ю., 53, 54, 96, 97, 307, 309,
 310, 311
 Прохоров А.Е., 279, 312
 Псахье С.Г., 430
 Пугачева Н.Б., 64, 244, 313, 345
 Путилова Е.А., 314
 Путьрский С.В., 295
 Пхон Хтет Кьяв, 305
 Пышминцев И.Ю., 70, 204, 314
 Радченко А.В., 32
 Радченко В.П., 199, 315
 Радченко П.А., 32
 Разоренов С.В., 326
 Резников Д.О., 317
 Рейзмунт Е.М., 116
 Реков А.М., 318
 Реутов Ю.А., 458
 Ригмант М.Б., 320
 Рогалин В.Е., 160, 161, 162
 Рогожин М.В., 162
 Родионов А.К., 66
 Родкевич Н.Г., 88, 321
 Родюшкин В.М., 322, 323
 Романова В.А., 122, 348
 Рузов А.В., 199
 Русяев А.Н., 231
 Рыбина С.С., 163
 Рыбьянец А.Н., 260
 Рьжков М.А., 213
 Рышков Н.М., 378
 Саблина Т.Ю., 101, 339, 462
 Саввина А.В., 66, 325
 Савельева Н.В., 279, 326
 Савиных А.С., 326
 Савкин А.Н., 327, 340
 Саврай Р.А., 106, 216, 218, 330, 331
 Савченко Н.Л., 101, 339, 460, 461, 462
 Сагалаков А.М., 227
 Салита Д.С., 333, 335
 Самодуров А.А., 409
 Самсонов А.А., 370, 371
 Сафаров И.М., 349
 Сафиуллин А.Р., 336, 337
 Сафиуллин Р.В., 336, 337
 Сафонов М.Д., 292, 295
 Саченков А.А., 28
 Саченков О.А., 338
 Севостьянова И.Н., 101, 339, 460, 461, 462
 Седов А.А., 327, 340
 Секаева Л.Р., 27
 Секисов Ю.Н., 41
 Семенов М.Е., 139, 342
 Семенова Е.В., 338
 Семенова Е.М., 163
 Сенаева Е.И., 345
 Сеньюль В.Т., 421
 Сербин Е.Д., 346
 Сергеев М.В., 122, 348
 Сергеев С.Н., 349
 Сероваев Г.С., 181
 Сидоров К.С., 450, 451
 Сизова О.В., 125
 Сильвестров С.А., 350, 351
 Скорынина П.А., 352
 Слепцова С.А., 354
 Слободенюков В.М., 451
 Слободянюк К.А., 164
 Словииков С.В., 356
 Слонов В.Н., 134
 Смирнов А.В., 118
 Смирнов А.Н., 109
 Смирнов А.С., 177, 357, 419
 Смирнов Е.Б., 450, 451
 Смирнов С.В., 71, 187, 360
 Смирнова А.С., 358
 Смирнова Е. В., 361
 Смирнова Е.О., 177, 244, 360
 Смирнова Н.В., 111
 Смолин А.Ю., 124
 Смолин И.Ю., 23, 235, 364
 Смолина И.Ю., 363
 Собакина М.П., 304
 Соболева Н.Н., 330, 366, 385
 Соковиков М.А., 367
 Соколов Р.А., 249
 Соловей В.Д., 369
 Соловьев П.С., 371
 Соловьев С.И., 370, 371
 Спевак Л.Ф., 264, 373
 Станкевич Р.В., 75
 Староверов О.А., 374, 375, 376
 Старостин Н.П., 18, 67, 401
 Стаскевич О.С., 207
 Степанов С.И., 378
 Степанова Л.В., 114, 379, 381, 383

Степнов М.Н., 135
 Степченков А.К., 385
 Сторожева Е.И., 102
 Стружанов В.В., 80, 386
 Струнгарь Е.М., 374, 387
 Стручкова Г.П., 265
 Сулейманов Р.Н., 388
 Сундер Р., 327, 340
 Сурикова Н.С., 258
 Суслов А.Г., 441
 Сызранцев В.Н., 390, 391
 Сызранцева К.В., 390, 391
 Сюй Инцянь, 28
 Тарасенко Ю.П., 37, 426
 Тарасов С.Ю., 417
 Татусь Н.А., 170, 392, 393
 Ташкинов А.А., 438
 Ташкинов М.А., 394
 Тельканов М.А., 395
 Темерова М.С., 396
 Тетерин Д.П., 134
 Тиан Х., 393
 Тимофеева Е.Н., 398
 Титов В.Г., 400
 Тиунова А.Д., 394
 Тихонов Р.С., 401
 Ткачев О.В., 451
 Торопицина А.В., 402
 Торская Е.В., 98
 Третьяков А.А., 285
 Третьяков Д.А., 34, 299
 Третьяков Е.В., 378
 Третьяков М.П., 374, 376, 403, 404
 Третьяков С.А., 163, 164
 Третьякова Т.В., 374, 404, 406
 Трофимов В.В., 449
 Трофимов В.Н., 165, 166
 Трусов П.В., 99, 173, 196, 214, 271, 395,
 434, 443, 445, 456
 Трушина Е.Б., 64, 313, 345
 Тюбаева П.М., 270, 408
 Тюменцев А.Н., 201
 Тюрин А.Е., 144
 Тюрин А.И., 409
 Уваров С.В., 30
 Урцев В.Н., 110
 Усков Д.П., 204
 Устюгова Т.Н., 410
 Утяганова В.Р., 339, 460, 461, 462
 Фадин В.В., 11, 13, 15
 Файзуллин А.З., 411
 Файзуллин И.З., 411
 Федоренко О.Н., 31
 Федоров Ю.Ю., 66, 325
 Федосеева В.И., 354
 Феклистова Е.В., 413
 Филин С.А., 160, 161
 Филиппов А.А., 415
 Филиппов А.В., 154, 414, 417, 436
 Филиппов М.А., 446
 Филиппова Ю.Ф., 416
 Фортуна С.В., 417
 Хакимов А.Г., 418
 Халевицкий Ю.В., 244, 357, 419
 Харин Н.В., 338
 Хачай А.Ю., 420
 Хачай О.А., 420
 Хачай О.Ю., 420
 Хейфец М.Л., 421
 Холмогоров С.А., 220, 422
 Хуснимарданов Р.Н., 424
 Царева И.Н., 37, 426
 Цветков В.В., 315
 Цветков Р.В., 89, 427, 447
 Ценев Н.К., 428
 Цуканов А.А., 430
 Чалина М.А., 431
 Чаплыгин К.К., 432
 Чекалкин А.А., 273, 388
 Черепанов А.Н., 51, 118, 119
 Чесноков А.Е., 118
 Чечулина Е.А., 434
 Чумаевский А.В., 83, 149, 150, 152, 153,
 154, 414, 436
 Чучкова Л.В., 437
 Шавшуков В.Е., 438
 Шалковский Д.М., 440
 Шаломеева А.А., 363
 Шалыгин М.Г., 441
 Шамим М.Ф., 27, 28
 Шарапова В.А., 446
 Шардаков И.Н., 89, 104, 442, 447
 Шарин П.П., 453
 Шарифуллина Э.Р., 443, 445
 Шваб Е.А., 122
 Швейкин А.И., 395, 443, 445
 Швейкин В.П., 446
 Шевелев М.М., 40
 Шестаков А.П., 427, 442, 447
 Шестакова К.Н., 448
 Шилько Е.В., 175
 Шипунов Г.С., 448
 Ширококов А.Е., 440
 Ширяев А.А., 449

Шестириков М.А., 450
Шитов А.М., 171
Шишин Н.Н., 26
Шлишевский А.В., 303
Шлянников В.Н., 84
Шляхова Г.В., 302
Шмидт А., 239
Шмидт В.В., 111
Юдин А.В., 378

Юрлов М.А., 272
Юсупов Д.Т., 440, 450, 451
Якимов А.К., 58, 452
Якимова М.Н., 440
Яковлев В.В., 241
Яковлева С.П., 56, 453
Якупов Р.Р., 455
Янкин А.С., 387
Янц А.Ю., 456

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА В УСЛОВИЯХ МНОГОФАКТОРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ТИПА КОФФИНА Аврущкий В.В., Зинин А.В., Бычков Н.Г., Андросович И.В.	3
АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОМ ВЫДАВЛИВАНИИ Агапитова О.Ю., Бывальцев С.В., Залазинский А.Г.	5
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ И ОПИСАНИЕ ВЯЗКОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА Адамов А.А.	7
МЕТОД РИТМОКАРДИОГРАФИИ В ОЦЕНКЕ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА В ВЕГЕТАТИВНЫХ НАГРУЗОЧНЫХ ПРОБАХ У МУЖЧИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИСХОДНОГО ВЕГЕТАТИВНОГО ТОНУСА Акимова А.В., Миронов В.А.	8
МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОЙ МАТРИЦЕ (СВМПЭ) Панин С.В., Корниенко Л.А., Валентюкевич Н.Н., Алексенко В.О., Иванова Л.Р.	10
СТРУКТУРА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВОССТАНОВЛЕННОЙ СТАЛИ ШХ15, СПЕЧЕННЫХ НА ВОЗДУХЕ, И ИХ ИЗНОС ПРИ ТРЕНИИ С ТОКОСЪЕМОМ ПО МЕДИ Алеутдинова М.И., Фадин В.В.	11
ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ КОНТАКТНОГО СЛОЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ ПО СТАЛИ 45 Фадин В.В., Алеутдинова М.И., Почивалов Ю.И.	13
ОБ ОБРАЗОВАНИИ СТРУКТУРНО-ИЗМЕНЕННЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В УСЛОВИЯХ СКОЛЬЖЕНИЯ Фадин В.В., Алеутдинова М.И.	15
СВАРИВАЕМОСТЬ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА Корнилова З.Г., <u>Аммосов А.П.</u> , Аммосов Г.С.	17
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ В РАСТРУБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ Аммосова О.А., Старостин Н.П.	18
ОЦЕНКА МЕХАНИЗМА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕН ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ Андреященко В.А.	19
ВЛИЯНИЯ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ МАРКИ А85 Анучина Е.А., Загуляев Д.В., Громов В.Е.	21
АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ И КАТАСТРОФИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ Ахметов А.Ж., Кульков А.С., Смолин И.Ю.	23
КОМПАКТИРОВАНИЕ БРИКЕТА В КОНТЕЙНЕРЕ, СНАБЖЕННОМ МАЛОЙ КОНУСНОСТЬЮ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Полянский Л.И., Первушина Д.Н.	24
ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МНОГОПРОХОДНОГО ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ Шишин Н.Н., Бабайлов Н.А.	26

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ Бережной Д.В., Шамим М.Ф., Балафендиева И.С., Секаева Л.Р.	27
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФРИКЦИОННЫХ РАЗЪЕМОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ Бережной Д.В., Шамим М.Ф., Балафендиева И.С., Саченков А.А., Сюй Инцянь	28
ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ФОНТАННОЙ АРМАТУРЫ И ТРУБОПРОВОДОВ ГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА СТАДИИ ПАДАЮЩЕЙ ДОБЫЧИ Балина О.В., Насонов В.В.	29
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПРИ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ Банников М.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б.	30
ФРИКЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ПРУЖИННЫХ МАТЕРИАЛОВ Бараз В.Р., Федоренко О.Н., Андрианов И.В.	31
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С РАЗЛИЧНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ Радченко П.А., Батуев С.П., Радченко А.В., Плевков В.С.	32
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ Бутманов Д.Д., Банников М.В., Баяндин Ю.В.	33
ДИСКРЕТНЫЙ И КОНТИНУАЛЬНЫЙ ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ СЛУЧАЙНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ Беляев А.К., Полянский В.А., Грищенко А.И., Лобачев А.М., Третьяков Д.А.	34
МЕТОД МНОГОЧЛЕНОВ ГЛАВНЫХ МИНОРОВ В РАСЧЕТАХ АКУСТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В АНИЗОТРОПНОМ СЛОЕ Беляев Ю.Н.	35
ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ Беляева Н.А., Габов И.П.	36
ОЦЕНКА ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА РАБОЧИХ ЛОПАТОК В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ПОЗИЦИИ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ Бердник О.Б., Царева И.Н., Кириков С.В., Кривина Л.А., Тарасенко Ю.П.	37
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОРИСТОСТИ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССЕ БРИКЕТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ГУБЧАТОГО ТИТАНА Березин И.М., Нестеренко А.В., Залазинский А.Г.	38
УСТАНОВКА СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ Лехов О.С., Михалев А.В., Билалов Д.Х., Шевелев М.М.	40
СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПАР ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ Блинов А.В., Боровик С.Ю., Мухутдинов Ф.И., Секисов Ю.Н.	41
ОБ ОДНОЙ МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА Богачев И.В., Ватульян А.О.	43
ПРОЧНОСТНЫЕ И ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОБАРИЧЕСКИ СПЕЧЕННЫХ НАНОАЛМАЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Богданов А.С., Богданов Д.Г., Плотников В.А., Макаров С.В.	44

СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАБОТАННЫХ ДОРНОВАНИЕМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАСТИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ Бознак А.О., Арляпов А.Ю., Дмитриев А.И.	46
EFFECT OF BROMINATED UHMWPE ON THE PROPERTIES AND STRUCTURE OF RESULTING UHMWPE-BASED BORON CARBIDE NANOCOMPOSITES Borisova R.V., Nikiforov L.A., Okhlopko T.A., Spiridonov A.M., Okhlopko A.A., Koryakina N.S.	47
ПОЛУЧЕНИЕ РЕЦЕПТУРЫ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ СВМПЭ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ Панин С.В., Гришаева Н.Ю., Люкшин П.А., Люкшин Б.А., Панов И.Л., Бочкарева С.А., Матолыгина Н.Ю., Алексенко В.О.	48
МЕЖФАЗНЫЙ СЛОЙ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ НАПОЛНЕННОГО ЭПОКСИДНОГО КОМПОЗИТА Брусенцева Т.А.	49
ВЛИЯНИЕ НАНОПОРОШКОВЫХ ИНОКУЛЯТОРОВ НА ДЕФОРМАЦИЮ СПЛОШНОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАПЛИ ПОСЛЕ ЕЕ СОУДАРЕНИЯ С ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ Бублик В.В., Черепанов А.Н.	51
ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЛЬСАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАЗРУШАЮЩИХ И НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В.	52
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СДВИГОВОЙ КОНВЕКЦИИ МАРАНГОНИ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ Бурмашева Н.В., Просвиряков Е.Ю.	53
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ДЛЯ СЛОИСТОЙ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ Бурмашева Н.В., Просвиряков Е.Ю.	54
ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СТАЛЕЙ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПОСЛЕ 50-ТИЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА Бурнашев А.В., Большаков А.М.	55
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ОТКАЗОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ Буслаева И.И., Яковлева С.П.	56
ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ В ФОРМИРОВАНИИ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСТРУДИРУЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОЙ МАТРИЦЫ Панин С.В., Корниенко Л.А., Буслович Д.Г., Донцов Ю.В., Иванова Л.Р.	57
СОЗДАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕКСТИЛЬНОЙ ОСНОВЕ С ЛИТЬЕВЫМ ПОЛИУРЕТАНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ Бутусова Е.Н., Якимов А.К.	58
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ О ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ С ТРАНСВЕРСАЛЬНО-МЯГКИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ Бадриев И.Б., Буянов В.Ю., Макаров М.В.	60
О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА И РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ГЛУБИН ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В.	62
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОГО ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ Пугачева Н.Б., Быкова Т.М., Трушина Е.Б., Малыгина И.Ю.	64

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СВАРНОГО СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ Федоров Ю.Ю., Саввина А.В., Васильев С.В., Родионов А.К.	66
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ТРУБЫ И МУФТЫ СМЕННЫМИ НАСАДКАМИ ДЛЯ РАСТРУБНОЙ СВАРКИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ Васильева М.А., Старостин Н.П.	67
АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 08X18N10T В ОБЛАСТИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ Ведерникова А.И., Плехов О.А.	68
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НОЖЕЙ КУТТЕРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ Веремейчик А.И.	69
ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМО- ЛИБДЕНОВЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ Пышминцев И.Ю., Веселов И.Н., Мальцева А.Н.	70
ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА B95/SiC С СОДЕРЖАНИЕМ ЧАСТИЦ SiC 20 ОБ. % ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 450 °С Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Нестеренко А.В., Копейна А.В.	71
ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЙ-ГРАФЕНОВОГО МЕТАЛ- ЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА С СОДЕРЖАНИЕМ ГРАФЕНА 2 МАС. % ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 300 °С Вичужанин Д.И., Елшина Л.А., Мурадымов Р.В., Нестеренко А.В.	73
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСРЕДНЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ СПЕКЛОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦИЙ И ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПЕРИОДИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ОБЪЕКТАХ Владимиров А.П.	74
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 17Г1С, ПОДВЕРГНУТОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МЕХАНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ Панин С.В., Власов И.В., Почивалов Ю.И., Еремин А.В., Станкевич Р.В.	75
INFLUENCE OF LONG-TERM OPERATION ON THE STRUCTURE AND IMPACT TOUGHNESS OF 09Mn2Si PIPE STEEL Vlasov I.V., Panin S.V., Marushchak P.O., Eremin A.V., Byakov A.V.	76
ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ Власова Д.В., Плохих А.И.	78
МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕ- ФОРМАЦИЙ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ВНУТРЕННИЕ МЕЗО- И МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ Волегов П.С., Озерных В.С.	79
ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОЙ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗА- ПАСА ПРОЧНОСТИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ Волков С.С., Стружанов В.В.	80
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ФЕР- РИТО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ Воронцов А.В., Дмитриев А.В., Белобородов В.А.	82

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ Воронцов А.В., Чумаевский А.В., Калашников К.Н.	83
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН НА ОСОБЕННОСТИ ДИССИПАЦИИ ТЕПЛА В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Захаров А.П., Шлянников В.Н., Плехов О.А.	84
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ SiO ₂ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ Галлямова Р.Ф., Галышев С.Н., Бадамшин А.Г., Мусин Ф.Ф., Докичев В.А.	85
ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПОРОШКОВ ДЛЯ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ Al/V ₄ C-КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ Гладковский С.В., Кутенева С.В., Двойников Д.А., Веселова В.Е.	86
СЛОИСТЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ С ВЫСОКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ Гладковский С.В., Каманцев И.С., Кутенева С.В., Двойников Д.А., Кузнецов А.В.	87
СПЕКАНИЕ ПОРОШКОВ W-Ni-Fe, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОЛОК Глазкова Е.А., Первиков А.В., Родкевич Н.Г., Апкарьян А.С., Мужецкая С.Ю.	88
ОЦЕНКА РЕСУРСА ДЕФОРМАЦИОННОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ ИНЖЕНЕРНОГО СООРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА Глот И.О., Шардаков И.Н., Цветков Р.В., Бартоломей М.Л.	89
РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКО-МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА, ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН Петрова П.Н., Гоголева О.В., Аргунова А.Г.	90
РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ АЛЮМИНИЙ-СТАЛЬ ДЛЯ ПАКЕТНОЙ ФОРМОВКИ УГЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА Гомзин А.И., Галышев С.Н., Назаров А.Ю., Варданян Э.Л., Мусин Ф.Ф.	92
ОЦЕНКА РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ТЕРМО-УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ Гончар А.В., Мишакин В.В., Ключников В.А., Курашкин К.В.	93
ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ АРМКО-ЖЕЛЕЗА Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С.	95
КРУПНОМАСШТАБНОЕ КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ НА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.	96
ВИХРЕВОЕ КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛОСКОСТИ Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.	97
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ Горячева И.Г., Торская Е.В.	98
ОПИСАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ Грибов Д.С., Трусов П.В.	99

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ С УНИМОДАЛЬНОЙ И ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ПОРИСТОСТЬЮ ПРИ СЖАТИИ Григорьев М.В., Саблина Т.Ю., Севостьянова И.Н., Савченко Н.Л., Буякова С.П., Кульков С.Н.	101
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРОГРАММАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ Губин В.В., Аникеев Н.А., Дьяченко Д.И., Сторожева Е.И.	102
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ В СТЕНКАХ РЕЗЕРВУАРОВ НЕФТЕХРАНИЛИЩ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ Гусев Г.Н., Маккавеев А.В., Шардаков И.Н.	104
ОБ ОЦЕНКЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОГРУЖНЫХ СВАЙ МЕТОДАМИ ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ УДАРА Гусев Г.Н., Маккавеев А.В., Матвеев В.П.	105
ВЛИЯНИЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ Саврай Р.А., Давыдова Н.А., Макаров А.В., Малыгина И.Ю.	106
СПОСОБЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ШВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ Герасимов А.И., Данзанова Е.В., Ботвин Г.В.	108
ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА, ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩЕГО В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ. КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ Данилов В.И., Смирнов А.Н., Абабков В.Н., Горбатенко В.В.	109
ВЛИЯНИЕ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ТРУБНОЙ СТАЛИ ПРИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ (ТМСР) Краснов М.Л., Платов С.И., Урцев В.Н., Данилов С.В., Пастухов В.И., Лобанов М.Л.	110
УНИКАЛЬНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ СПЛАВОМ FE-NI С НОВЫМИ ФАЗАМИ Жихарева И.Г., Денисенко Д.В., Шмидт В.В., Смирнова Н.В.	111
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛА ОЦК-ЖЕЛЕЗА В УСЛОВИЯХ СДВИГОВОГО НАГРУЖЕНИЯ Дмитриев А.И., Никонов А.Ю.	113
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В ЛИНЕЙНО УПРУГОМ ИЗОТРОПНОМ МАТЕРИАЛЕ: МНОГО- ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ М. УИЛЬЯМСА С УЧЕТОМ ВЫСШИХ ПРИБЛИЖЕНИЙ Долгих В.С., Степанова Л.В.	114
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В РЕЗЕРВУАРЕ ПРИ ОСАДКЕ ОСНОВАНИЯ Рейзмунт Е.М., Доронин С.В.	116
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ СПЛАВА 1420, ПОЛУЧЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ Дроздов В.О., Оришич А.М., Маликов А.Г., Карпов Е.В., Павлов Н.А., Месенцова И.С.	117
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ КОМПОЗИЦИОН- НЫХ ПОРОШКОВ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ Дроздов В.О., Черепанов А.Н., Чесноков А.Е., Смирнов А.В.	118
О СВАРКЕ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ Черепанов А.Н., Дроздов В.О., Оришич А.М., Маликов А.Г.	119

ДВЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРОУПРУГОГО СТЕРЖНЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ Ватульян А.О., Дударев В.В., Недин Р.Д.	120
CRYSTAL PLASTICITY SIMULATIONS OF TITANIUM SYNGLE CRYSTAL DEFORMATION BEHAVIOR Emelianova E.S., Romanova V.A., Balokhonov R.R., Sergeev M.V.	121
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИЗАЙНА ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ И КЕРАМИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ Балохонов Р.Р., Романова В.А., Кульков С.Н., Шваб Е.А., Емельянова Е.С., Сергеев М.В., Батухтина Е.Е.	122
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В АСЕЙСМИЧНЫХ И СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНАХ Еремин М.О.	123
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЯ TIN НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВДЕНИЕ СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ–ПОДЛОЖКА» Еремина Г.М., Смолин А.Ю.	124
ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ СПЛАВА АМГ5 НА ДЕФЕКТНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ Заикина А.А., Колубаев А.В., Сизова О.В., Колубаев Е.А.	125
ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА Большаков А.М., Захарова М.И.	126
STRUCTURAL (MACRO-MESO) AND PHISICAL-MECHANICAL TRANSFORMATIONS IN COPPER DURING SEVERE PLASTIC DEFORMATION Rogachev S.O., Zemlyakova N.V.	127
ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЛИЗИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ, ОБРАЗОВАННОЙ В ВОЛОКНИСТОМ КОМПОЗИТЕ, ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ Зингерман К.М., Каплунов И.А.	128
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕСУРСА КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МАЛОМ ОБЪЕМЕ ИСПЫТАНИЙ Зинин А.В.	129
ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ АРАМИДНЫХ НИТЕЙ Злобина И.В., Бекренев Н.В.	132
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО УПРОЧНЯЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Злобина И.В., Бекренев Н.В., Тетерин Д.П., Слонов В.Н.	134
ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО УРАВНЕНИЯ ПОДОБИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ Степнов М.Н., Зубань В.Н., Зинин А.В.	135
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Зубова Е.М., Вильдеман В.Э.	137

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА «ПАВЛОВСК–МАЙЯ» Большаков А.М., Иванов А.Р.	138
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНО- ВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НЕФТЕПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД Иванова И.К., Семенов М.Е., Корякина В.В.	139
ФОРМАЛИЗАЦИЯ MORFOЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ КАМНЕЛИТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ СВОЙСТВ Игнатова А.М., Верещагин В.И., Игнатов М.Н.	142
МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ДВУХОСНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ Ильиных А.В.	143
ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОГРУЖНЫХ НЕФТЕНАСОСОВ Исмаилов Г.М., Тюрин А.Е., Павлов М.С., Минеев В.Е.	144
ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ПОДРОСТКОВОМ ДЕНТИНЕ НА МИКРО- И НАНО-УРОВНЕ Кабанова А.В., Занг Ц., Панфилов П.Е.	146
О КОНТАКТЕ РЕГУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ ШТАМПОВ И СЛОИСТЫХ ОСНОВАНИЙ С УЧЕТОМ СЛОЖНЫХ ФОРМ ПОВЕРХНОСТЕЙ Казаков К.Е.	147
ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10, СВАРЕННОЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ Калашников К.Н., Жуков Л.Л., Дмитриев А.В., Калашникова Т.А.	148
ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ ТРЕНИ- ЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ Калашников К.Н., Чумаевский А.В., Иванов А.Н.	149
ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ИНСТРУМЕНТА Калашников К.Н., Чумаевский А.В., Воронцов А.В.	150
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В УСЛОВИЯХ УЛЬТРА- ЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ Калашникова Т.А., Белобородов В.А., Калашников К.Н.	151
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И СУХОМ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ Калашникова Т.А., Чумаевский А.В., Иванов А.Н.	152
СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УЛЬТРАМЕЛКОДИСПЕРСНОМ СОСТОЯНИИ, ПОЛУЧЕННЫХ МНОГОКРАТНЫМИ ПРОХОДАМИ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ Калашникова Т.А., Чумаевский А.В., Калашников К.Н.	153
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 12Х18Н9Т, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ЭЛЕК- ТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ Калашникова Т.А., Чумаевский А.В., Филиппов А.В.	154
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ГОРЯЧЕГО КОМПАКТИРОВАНИЯ ПО- РОШКОВОГО КОМПОЗИТА AL/V ₄ C Коковихин Е.А., Волков В.П., Каманцев И.С., Гладковский С.В.	155
АНАЛИЗ РАБОТЫ СОВРЕМЕННЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ Каменских А.А.	156

<p>ДИАГНОСТИКА СУБЪЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОКОВОК Канюков С.И., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю.</p>	158
<p>ОНТОЛОГИЯ ВХОДНОГО ЯЗЫКА САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ВАЛОВ НА ПРЕССАХ Канюков С.И., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю.</p>	159
<p>ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА РАСТВОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ СИЛОВОЙ МЕТАЛЛООПТИКИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕЕ РЕСУРСА Филин С.А., Рогалин В.Е., Каплунов И.А.</p>	160
<p>НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ИК ЛАЗЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ Рогалин В.Е., Филин С.А., Каплунов И.А.</p>	161
<p>ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ВЫХОДНЫХ ОКОН ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ С НЕУСТОЙЧИВЫМ РЕЗОНАТОРОМ Рогожин М.В., Рогалин В.Е., Крымский М.И., Каплунов И.А.</p>	162
<p>РОЛЬ НАНОВЫСТУПОВ В ПОЯВЛЕНИИ БЛИКОВ НА ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА Колесников А.И., Каплунов И.А., Ляхова М.Б., Третьяков С.А., Семенова Е.М., Иванов А.М., Айдинян Н.В., Воронцов М.С., Рыбина С.С., Иванова П.В.</p>	163
<p>ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ НА РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ Колесников А.И., Третьяков С.А., Каплунов И.А., Иванова А.И., Воронцов М.С., Молчанов С.В., Слободянюк К.А.</p>	164
<p>К ВОПРОСУ О РЕКОНСТРУКЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПЛАСТИНЫ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ Келлер И.Э., Петухов Д.С., Трофимов В.Н.</p>	165
<p>ПРЕДЕЛЬНАЯ КРИВАЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА: ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ И КРИТЕРИЯ ВЯЗКОГО РАЗРУШЕНИЯ Казанцев А.В., Келлер И.Э., Петухов Д.С., Трофимов В.Н.</p>	166
<p>ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА НА ОСНОВЕ ВИХРЕТОКОВЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ УСТАЛОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ Мишакин В.В., Гончар А.В., Клюшников В.А., Курашкин К.В.</p>	167
<p>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н9Т УЛЬТРАЗВУКОВЫМ И ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДАМИ Клюшников В.А., Мишакин В.В., Гончар А.В.</p>	168
<p>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА И РАЗМЕРА СТРУКТУРНОГО ДЕФЕКТА ПО ИЗМЕНЕНИЮ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ВИБРАЦИОННЫХ ОТКЛИКОВ КОНСТРУКЦИИ Кокуров А.М., Татусь Н.А.</p>	170
<p>ДИАГНОСТИКА – ОСНОВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ Кондратьев И.М., Шитов А.М.</p>	171
<p>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАСЕТОК ГРАНИЦ НОВЫХ ЗЕРЕН В ПРОЦЕССЕ СТАТИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ Кондратьев Н.С., Трусов П.В.</p>	173
<p>БИОНИЧЕСКИЙ ДИЗАЙН СТРУКТУРЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ Коновалекно И.С., Шилько Е.В.</p>	175
<p>ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА АМГ6/10 % SiC МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИФИКАЦИОННОГО Коновалов Д.А., Смирнова Е.О., Смирнов А.С.</p>	177

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФИНИШНОГО ПОЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ НАНОШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ Королева Л.Ф.	178
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ, ДИФФУЗИОННЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОЭНТРО- ПИЙНЫХ СПЛАВОВ CoCrFeMnNi Корчуганов А.В., Луценко И.С.	179
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ПАРОГРАВИТАЦИОННОГО ДРЕНАЖА Костина А.А., Желнин М.С., Плехов О.А.	180
РАСЧЕТ НДС В СИСТЕМЕ ПКМ-ОПТИЧЕСКОЕ НЕПРЯМОЛИНЕЙНО РАСПОЛОЖЕННОЕ ВОЛОКНО Сероваев Г.С., Кошелева Н.А.	181
РАЗВИТИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАК- ТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ Красновейкин В.А., Коноваленко И.С.	183
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ Красновейкин В.А., Коноваленко И.С.	184
ИЗГОТОВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ Круглов А.А., Еникеев Ф.У.	185
АТОМНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЗАРОЖДЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВАНАДИИ Крыжевич Д.С., Корчуганов А.В., Зольников К.П.	186
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ Смирнов С.В., Крючков Д.И., Нестеренко А.В., Березин И.М., Вичужанин Д.И.	187
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЛОЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ОТРЫВ Крючков Д.И., Залазинский А.Г., Агапитова О.Ю.	188
ЖИВУЧЕСТЬ КАБИНЫ ЛОКОМОТИВА ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕПЯТСТВИЯ И УСЛОВИЙ СТОЛКНОВЕНИЯ НА ПЕРЕЕЗДЕ Емельянов И.Г., Миронов В.И., Кузнецов А.В.	189
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РОСТА ТРЕЩИНЫ В ПЛАСТИНЕ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА. Кузнецов А.В., Друкаренко Н.А., Каманцев И.С., Миронов В.И.	190
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ МЕДЛЕННОМ ДВИЖЕНИИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ Кузоватова О.И.	191
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ Курашкин К.В., Гончар А.В.	195
МНОГОУРОВНЕВОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ТИТАНЕ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ Курмоярцева К.А., Трусов П.В.	196
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ Ли Ю.В., Баранникова С.А., Зуев Л.Б.	198
РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННОМ ПО- ЛОМ ЦИЛИНДРЕ ИЗ СТОХАСТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ Радченко В.П., Либерман А.Е., Рузов А.В.	199

ВЛИЯНИЕ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ОТЖИГОВ НА ОБРАТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ МАРТЕНСИТ–АУСТЕНИТ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЮ В МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ Литовченко И.Ю., Тюменцев А.Н., Аккузин С.А.	201
ДЕГРАДАЦИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ С ЗАПОЛНИТЕМ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НА РАСТЯЖЕНИЕ, СЖАТИЕ И СДВИГ Лобанов Д.С.	202
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ СДВИГОВОГО ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В БЕСШОВНЫХ ТРУБАХ Лобанов М.Л., Пышминцев И.Ю., Мальцева А.Н., Усков Д.П., Данилов С.В., Пастухов В.И., Макарова Е.А.	204
ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ПОГЛОЩЕННОЙ МАТЕРИАЛОМ В ПРОЦЕССЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Лукин Е.С.	205
ПОИСК КРИТЕРИЕВ УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН РЭЛЕЯ Лунев А.Г., Надежкин М.В., Бочкарева А.В., Стаскевич О.С.	207
ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ОДНООСНОМАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ Лыкова А.В., Ильиных А.В.	209
COMPARISON OF FRICTION AND ACOUSTIC EMISSION OF HADFIELD STEEL SINGLE CRYSTALS Lychagin D.V., Filippov A.V., Kolubaev E.A., Sizova O.V., Tsvetkov N.A.	210
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ, ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю., Панин С.В., Реутов Ю.А.	211
ПОВЫШЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СТАЛИ НУ-TUF ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ В БЕЙНИТНОЙ ОБЛАСТИ Майсурадзе М.В., Рыжков М.А.	213
ПРЯМАЯ МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ Макаревич Е.С., Кондратьев Н.С., Трусов П.В.	214
НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНО-ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ Макаров А.В., Саврай Р.А., Малыгина И.Ю., Волкова Е.Г., Бузов С.В.	216
УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ СКЛЕРОМЕТРИИ, АЗОТИРОВАННОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРОВЕДЕНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ Лежнин Н.В., Макаров А.В., Гаврилов Н.В., Осинцева А.Л., Саврай Р.А.	218
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ Бадриев И.Б., Макаров М.В., Паймушин В.Н., Холмогоров С.А.	220
ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТНО-ПРОЕКТИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ ПРЕЦИЗИОННОГО КЛАССА Максименко А.А., Перфильева Н.В., Борисова А.Д.	221

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ АЛЬФА-ТИТАНА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ Неласов И.В., Липницкий А.Г., Картамышев А.И., Максименко В.Н., Колобов Ю.Р.	224
PROGRESSIVE FAILURE ANALYSIS OF VARIABLE STIFFNESS COMPOSITE STRUCTURES Malakhov A.V., Polilov A.N., Tian X.	225
ДИНАМИКА ДИСЛОКАЦИЙ ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ Малашенко В.В.	226
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДОВ СТАЛЬ-ДИЭЛЕКТРИК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХМИНИАТЮРНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ Катасонов А.О., Маликов В.Н., Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Сагалаков А.М.	227
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ АКТИВАЦИИ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН МАРКИ УВИС-АК-П Маркова М.А., Петрова П.Н.	229
ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ZrO_2 ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОДСЛОЯ $NiAl$ Мартынов С.А., Русяев А.Н., Кастеров А.М.	231
MODIFICATION OF THE SURFACE OF TITANIUM ALLOYS BY THERMAL OXIDATION Golubev V.I., Medison V.V., Pegashkin V.F.	232
ДИФФУЗИОННОЕ БОРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ТРЕНИЯ Мигаль Ю.Ф., Колесников В.И.	233
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ КЕРАМИКИ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ПОРИСТОСТЬЮ НА МЕЗОУРОВНЕ Микушина В.А., Смолин И.Ю.	235
ВЕГЕТАТИВНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ПЕЙСМЕКЕРНОЙ АКТИВНОСТИ СИНОАТРИАЛЬНОГО УЗЛА ПРИ ХОБЛ В ПЕРИОДЫ ОБОСТРЕНИЯ И РЕМИССИИ Миронова Т.Ф., Миронов В.А., Андреев А.Н., Милащенко А.И., Акимова А.В.	237
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОЛАМИНАТОВ Минаков А.А., Плохих А.И., Шмидт А., Вальтер Ф.	239
МЕТОД ОЦЕНКИ НАВОДОРОЖИВАНИЯ ОБОЛОЧКИ С ПЕРЕМЕННЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ Емельянов И.Г., Миронов В.И.	240
ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИОННОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ КРАНА Миронов В.И., Огорелков Д.А., Яковлев В.В.	241
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕКСТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПАРАМЕТРАХ ОСЬ-УГОЛ Берестова С.А., Копытов Н.П., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А.	242
ОБЛАСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕКСТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОРТОТРОПНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ С КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ РЕШЕТКИ Берестова С.А., Копытов Н.П., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А.	243
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ Мичуров Н.С., Пугачева Н.Б., Веретенникова И.А., Халевицкий Ю.В., Смирнова Е.О., Игумнов А.С.	244
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ Мкртычев О.В.	245
СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ЖЕСТКОГО УГЛЕРОДНОГО НАНОСЛОЯ НА ЭЛАСТОМЕРНОЙ ПОДЛОЖКЕ ПОСЛЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ Морозов И.А., Каменецких А.С., Беляев А.Ю.	246

CHOOSING STONE ROCKS FOR APPLICATION IN NEW GENERATION CONCRETE Moskvin R. N., Belyakova E. A., Yurova V. S.	247
THE STRUCTURE OF SnO ₂ -Ag COATING FORMED ON COPPER BY ELECTROEXPLOSION Moskovsky S.V., Romanov D.A., Gromov V.E., Filyakov A.D., Ysova A.V., Boykova A.V.	248
ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СТЕПЕННОЙ МАГНИТОУПРУГОЙ РЕЛАКСАЦИИ СТАЛИ 30Х13 ОТ АМПЛИТУДЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР ОТПУСКА Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Соколов Р.А.	249
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ РЕЗИН НА ОСНОВЕ ЭПИ- ХЛОРИДРИНОВОГО И БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА Мухин В.В., Петрова Н.Н., Маскалюнайте О.Е.	252
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАСЛОНА- ПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФЕНИЛОНА С-2 Колесников В.И., Мясников Ф.В., Новиков Е.С., Карпенко К.И.	254
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КРИТЕРИЙ ПЕРЕХОДА К ПЛАСТИЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЮ КОН- СТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ Лунев А.Г., Надежкин М.В.	256
МНОГОМАСШТАБНАЯ КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ И ОЦЕНКА РЕСУРСА Наймарк О.Б.	257
РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БЕЗНИКЕЛЕВОЙ ВЫСОКО- АЗОТИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ Наркевич Н.А., Миронов Ю.П., Сурикова Н.С., Дерюгин Е.Е.	258
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ НАНОПОРИСТЫХ УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БЕЗРАЗМЕРНОГО КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ Наседкин А.В., Корниевский А.С.	259
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ ГОМОГЕНИЗАЦИЯ НЕОДНОРОДНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ПОРИСТОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ЧАСТИЧНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОР Наседкин А.В., Наседкина А.А., Рыбьянец А.Н.	260
ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОУПРУГОГО ЭФФЕКТА ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СТАЛЕЙ Нассонов В.В., Балина О.В.	261
ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРОДНОГО ПРЕД- НАПРЯЖЕННОГО ТЕРМОЭЛЕКТРОУПРУГОГО СТЕРЖНЯ Ватульян А.О., Нестеров С.А.	262
НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОЭЛЕКТРОУПРУГОСТИ ДЛЯ ПРЕДНАПРЯЖЕННОЙ ПЛАСТИНЫ-ПОЛОСЫ Ватульян А.О., Нестеров С.А.	263
ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА ДЛЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОБЛАСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Спевак Л.Ф., Нефедова О.А.	264
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНО- ГО ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ ЛЬДИСТОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ Николаева М.В., Стручкова Г.П., Атласов Р.А.	265
АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ИЗЛУЧАЕМОЙ ОТДЕЛЬНЫМИ ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРЫ ГЦК РЕШЕТКИ. МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ Никонов А.Ю., Жармухамбетова А.М.	267

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АМГ6 И Д16Т ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ГИГАЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ Оборин В.А., Наймарк О.Б.	268
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ТЕЛ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ Одинцев И.Н.	269
СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИ- ГИДРОКСИБУТИРАТА С КОМПЛЕКСАМИ ЖЕЛЕЗО (III) – ТЕТРАФЕНИЛПОРФИРИН Ольхов А.А., Тюбаева П.М., С.Г. Карпова, Лобанов А.В., Попов А.А., Иорданский А.Л.	270
ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОМПОНЕНТ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ТЕКСТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ И КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА Остапович К.В., Трусов П.В.	271
О РАСПОЛОЖЕНИИ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА В КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ В ЗАДАННОМ ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ Ошмарин Д.А., Юрлов М.А.	272
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИ- МЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ Палкин Д.Д., Чекалкин А.А.	273
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРИКЦИОННОГО ИЗНОСА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ НАГРЕВА Панин С.В., Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Гришаева Н.Ю., Матолыгина Н.Ю.	274
ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТРУБ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Панин С.В., Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю., Реутов Ю.А.	276
CELLULAR AUTOMATA SIMULATION OF RECRYSTALLIZATION AT HOT CRACK SURFACES Moiseenko D.D., Panin S.V., Maksimov P.V., Babich D.S., Panin V.E. and Schmauder S.	278
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МЕТОДОВ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Пантелеев И.А., Савельева Н.В., Прохоров А.Е., Вшивков А.Н.	279
ДВУХСТАДИЙНЫЙ МЕТОД УТОЧНЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛОСКОСТНОЙ ЛОКА- ЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Пантелеев И.А., Бельтюков Н.Л., Паньков И.Л., Костина А.А.	280
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД Калачев В.А., Панфилов Г.П., Кочанов А.Н., Костандов Ю.А., Зайцев Д.В., Панфилов П.Е.	281
ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ОПТОВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ Паньков А.А.	283
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДВУХУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРО МАГНИТО ТЕРМОУПРУГОСТИ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ Паньков А.А.	284
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ДОСТОВЕРНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕТОДОМ МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ Аношкин А.Н., Осокин В.М., Пеленев К.А., Третьяков А.А.	285

ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕДЛЕННЫХ ВОЛН ДЕФОРМАЦИИ В УПРУГО-ПЛАСТИЧНЫХ СРЕДАХ Макаров П.В., Перышкин А.Ю.	287
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ НАНО-И ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ Петухова Е.С.	288
ЧИСЛЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ ПКМ Аношкин А.Н., Писарев П.В., Ермаков Д.А.	290
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ВЕРШИНЕ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В МЕТАЛЛАХ Плехов О.А., Изюмова А. Ю., Вшивков А.Н.	291
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ИНВАРНАЯ АНОМАЛИЯ В МНОГОСЛОЙНОМ СТАЛЬНОМ МАТЕРИАЛЕ Сафонов М.Д., Плохих А.И.	292
МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ Одинцев И.Н., Плугатарь Т.П.	293
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ФЕРРОМАГНИТНОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ РАЗМЕРОВ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА И ВЕЛИЧИНЫ НЕФЕРРОМАГНИТНОГО ЗАЗОРА Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М.	294
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАКТИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СТРУКТУРУ СТАЛЬНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ Поликевич К.Б., Путырский С.В., Сафонов М.Д., Плохих А.И.	295
МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКА Поляков А.П.	296
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА МЕТОДОМ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ Поляков П.А., Поляков А.П.	297
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА В СМЕСИ С Zn, Cu, P, C Поляков П.А., Мушников А.Н., Поляков А.П.	298
ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ И ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ Полянский В.А., Беляев А.К., Третьяков Д.А., Яковлев Ю.А.	299
ПРОГНОЗ РЕСУРСА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМИТНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ Попов А.В., Комаров О.Н., Предеин В.В., Жилин С.Г.	300
ПРЕРЫВИСТАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ: ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ ПРИМЕСЕЙ И ДИСЛОКАЦИЙ Попов Ф.С.	301
ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ Шляхова Г.В., Зуев Л.Б., Попова Е.А.	302
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ СРЕД ПРИ ОДНОКРАТНОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ Порошин В.Б., Шлишевский А.В.	303
УСТАНОВЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОТЕРИ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО ОДНОСТУПЕНЧАТОГО НАСОСА Овчинников Н.П., Портнягина В.В., Гуляев В.П., Собакина М.П.	304

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДАЧИ КОНЦОВ ТОНКОСТЕННЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ Потянихин Д.А., Марьин Б.Н., Пхон Хтет Кьяв	305
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГО РАСШИРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОХЛАЖДЕННОЙ ЗАКЛЕПКИ ПРИ СОЗДАНИИ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ Потянихин Д.А., Дубенко Е.М.	306
КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ КУЭТТА-ХИМЕНЦА. ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ЛИНЕЙНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ СЛОЯ ЖИДКОСТИ Привалова В.В., Просвиряков Е.Ю.	307
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА В ПОДВОДНОМ ПЕРЕХОДЕ ПРИ ПРОВИСЕ ГАЗОПРОВОДА В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗМЫВА ПРОФИЛЯ РЕКИ Большаков А.М., Прокопьев Л.А.	308
ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ Привалова В.В., Просвиряков Е.Ю.	309
НОВЫЕ КЛАССЫ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОЛЗУЩИХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКИХ НЕСЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ПРИБЛИЖЕНИИ СТОКСА И ОЗЕЕНА Просвиряков Е.Ю.	310
ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ Просвиряков Е.Ю.	311
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ Прохоров А.Е., Петрова А.Н., Плехов О.А.	312
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕМСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СИНТЕЗЕ КОМПОЗИТОВСИСТЕМЫ Fe-Ni-Ti-C-V Пугачева Н.Б., Николин Ю.В., Малыгина И.Ю., Трушина Е.Б.	313
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ РАБОТЕ В СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ Путилова Е.А., Пышминцев И.Ю., Веселов И.Н., Горкунов Э.С., Задворкин С.М.	314
МЕТОД РАСЧЕТА РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ Радченко В.П., Цветков В.В.	315
ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНОЙ ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД Резников Д.О.	317
ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ОБРАЗЦА ТИТАНА ВТ1-00 Реков А.М., Вичужанин Д.И.	318
ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МАРТЕНСИТА В ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ, МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ Муравьев В.В., Муравьева О.В., Ригмант М.Б., Корх М.К., Петров К.В., Башарова А.Ф.	320
СПЕКАНИЕ ПОРОШКА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОЛОКИ Родкевич Н.Г., Глазкова Е.А., Первиков А.В., Апкарьян А.С., Лернер М.И.	321
О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ЗНАКОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГИМИ ВОЛНАМИ Иляхинский А.В., Родюшкин В.М., Никитина Е.А.	322

ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН РЕЛЕЯ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 3 Иляхинский А.В., Родюшкин В.М., Никитина Е.А.	323
THE FORMATION OF THE STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF AN ELECTRIC EXPLOSIVE WEAR-RESISTANT COATING AFTER ELECTRON BEAM PROCESSING Romanov D.A., Sosnin K. V., Gromov V.E., Filyakov A.D., Ysova A.V., Boykova A.V.	324
ГАЗОПРОВОДЫ ДАВЛЕНИЕМ ДО 1,2 МПА ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ Федоров Ю.Ю., Саввина А.В., Васильев С.В.	325
ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СПЛАВА АМГ6 ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Наймарк О.Б.	326
ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РОСТА ТРЕЩИНЫ С УЧЕТОМ ЕЕ ЗАКРЫТИЯ И ВЛИЯНИЯ МЕ- СТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ Савкин А.Н., Сундер Р., Денисевич Д.С., Седов А.А., Бадиков К.А.	327
ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ КОНТАКТНОМ НАГРУЖЕНИИ НАПЛАВЛЕННОГО ЛАЗЕРОМ ПОКРЫТИЯ ПГ-10Н-01, ПОДВЕРГНУТОГО ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ Саврай Р.А., Макаров А.В., Горкунов Э.С., Соболева Н.Н., Коган Л.Х., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л.	330
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЫВУ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА Саврай Р.А., Макаров А.В.	331
АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СВИНЦОВЫХ СПЛАВОВ Егоров А.В., Поляков В.В., Салита Д.С.	333
МНОГОЧАСТОТНАЯ ВИХРЕТОКОВАЯ ДИАГНОСТИКА НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИГНАЛОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ Борцова Я.И., Егоров А.В., Лепендин А.А., Поляков В.В., Салита Д.С.	335
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПОЛЫХ КОНСТРУКЦИЙ Сафиуллин А.Р., Сафиллин Р.В.	336
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛЫХ ЯЧЕИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА Сафиуллин Р.В., Сафиуллин А.Р.	337
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРГАНА ИЗ КОСТНОЙ ТКАНИ ПО ДАННЫМ ТОМОГРАФИИ Герасимов О.В., Воробьев О.В., Семенова Е.В., Харин Н.В., Саченков О.А.	338
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ЦИРКОНИЯ И АЛЮМИНИЯ Севостьянова И.Н., Саблина Т.Ю., Савченко Н.Л., Григорьев М.В., Утяганова В.Р., Буякова С.П., Кульков С.Н.	339
ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ РЕГУЛЯРНОМ И НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ Савкин А.Н., Сундер Р., Седов А.А., Бадиков К.А.	340
ОЦЕНКА КОРРОЗИИ МЕТАЛЛА ПРИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИИ ГАЗОВ Семенов М.Е., Иванова И.К., Корякина В.В.	342
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ВСТАВОК ДЛЯ СВАРКИ СО ₂ -ЛАЗЕРОМ СТАЛИ 321 И ТИТАНОВОГО СПЛАВА Сенаева Е.И., Макаров А.В., Пугачева Н.Б., Трушина Е.Б., Вичужанин Д.И.	345

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ И МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМООБРАБОТКИ Костин В.Н., Сербин Е.Д.	346
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Сергеев М.В., Балохонов Р.Р., Романова В.А., Емельянова Е.С.	348
ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ Сергеев С.Н., Галеев Р.М., Сафаров И.М., Корзникова Г.Ф., Гладковский С.В., Двойников Д.А.	349
ИНКУБАЦИОННЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ СТРЕСС-КОРРОЗИИ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ Сильвестров С.А., Гумеров А.К.	350
ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ Зайцев Н.Л., Сильвестров С.А.	351
ПОВЫШЕНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМАЦИОННО СТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ Скорынина П.А., Макаров А.В., Волкова Е.Г., Осинцева А.Л.	352
ВЛИЯНИЕ КАОЛИНИТА НА СВОЙСТВА ПТФЭ Слепцова С.А., Лаукканен С., Гладкина Н.Н., Федосеева В.И., Григорьева Л.А.	354
ПОЛЗУЧЕСТЬ И РЕЛАКСАЦИЯ ПЛЕТЕНОЙ ПОЛИГЛИКОЛИДНОЙ ХИРУРГИЧЕСКОЙ НИТИ Словиков С.В.	356
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА АМГ6/10 % SiC В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО НАГРУЖЕНИЯ Смирнов А.С., Халевицкий Ю.В., Мясникова М.В.	357
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОВКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА ХАРАКТЕР УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT8-1 Смирнова А.С., Почивалов Ю.И., Панин В.Е.	358
АДГЕЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПОКСИДНОГО КЛЕЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ Смирнова Е.О., Веретенникова И.А., Смирнов С.В., Пестов А.В., Коновалов Д.А., Осипова В.А.	360
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ШАРНИРНО ЗАКРЕПЛЕННОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКИ С ТРАНСВЕРСАЛЬНО-МЯГКИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ Бадриев И.Б., Макаров М.В., Смирнова Е. В.	361
ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОРАМИ Смолин А.Ю., Шаломеева А.А., Смолина И.Ю.	363
АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ОБРАЗЦОВ КЕРАМИКИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ Смолин И.Ю., Кульков А.С. Микушина В.А., Макаров П.В., Красновейкин В.А.	364
ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОМУ ИЗНАШИВАНИЮ NiCrBSi ПОКРЫТИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ Макаров А.В., Соболева Н.Н., Гибзун М.С., Малыгина И.Ю., Коробов Ю.С.	366
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ Соковиков М.А., Наймарк О.Б.	367

ПОСТРОЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ СКОРОСТЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОСОБОГО СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ Соловей В.Д.	369
ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ШАРНИРНО ОПЕРТОЙ БАЛКИ С ГРУЗОМ Самсонов А.А., Соловьев С.И.	370
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЯ С УПРУГО ПРИСОЕДИНЕННЫМ ГРУЗОМ Самсонов А.А., Соловьев С.И., Соловьев П.С.	371
SELECTING LINES OF RESEARCH OF METHODS FOR CREATING BIOINERT ALLOYS WITH LOW-FREQUENCY MODULUS OF FIRST GENUS Sosnin K.V., Romanov D.A., Gromov V.E., Filyakov A. D., Ysova A.V., Boykova A.V.	372
ЗАДАЧА О ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЕ ДЛЯ ВЫРОЖДАЮЩЕГОСЯ НЕЛИНЕЙНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С ЗАДАННОЙ ФУНКЦИЕЙ ИСТОЧНИКА Казаков А.Л., Кузнецов П.А., Спевак Л.Ф.	373
МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Струнгарь Е.М., Третьяков М.П. Третьякова Т.В.	374
ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ СВОЙСТВ СЛОИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ Вильдеман В.Э., Староверов О.А.	375
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ДВУХОСНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Третьяков М.П.	376
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ 3D ПЕЧАТИ НА СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ Логинов Ю.Н., Степанов С.И., Рышков Н.М., Юдин А.В., Третьяков Е.В.	378
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ Степанова Л.В.	379
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОЛУДИСКА С ВЕРТИКАЛЬНЫМ И НАКЛОННЫМ НАДРЕЗОМ Степанова Л.В.	381
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРОЦЕДУР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА SIMULIA ABAQUS Степанова Л.В.	383
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА, СФОРМИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ Соболева Н.Н., Степченков А.К., Макаров А.В., Малыгина И.Ю.	385
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА С ПАДАЮЩЕЙ ВЕТВЬЮ ПО ДИАГРАММЕ ЧИСТОГО ИЗГИБА Стружанов В.В., Коркин А.В.	386
АНАЛИЗ ПОЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СДВИГ 3D-ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ Струнгарь Е.М., Янкин А.С., Бабушкин А.В.	387

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНОМ ГОРНОМ МАССИВЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД Сулейманов Р.Н., Чекалкин А.А.	388
ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ В ГАЗОПРОВОДЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЕГО ПРОЧНОСТНУЮ НАДЕЖНОСТЬ Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Андриенко Г.В.	390
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГАЗОПРОВОДА Сызранцева К.В., Сызранцев В.Н.	391
ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ К РАСЧЕТУ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ДЕФЕКТАМИ НА ПРИМЕРЕ ЛИСТОВЫХ РЕССОР Кокуров А.М., Татусь Н.А.	392
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Татусь Н.А., Полилов А.Н., Тиан Х.	393
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ МОРФОЛОГИИ СТРУКТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ Тиунова А.Д., Ташкинов М.А.	394
ДИСКЛИНАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ НЕУПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ Останина Т.В., Тельканов М.А., Трусов П.В., Швейкин А.И.	395
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛОТКАНИ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ Темерова М.С.	396
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СВОЙСТВА РЕЗИН НА ОСНОВЕ ЭПИХЛОРГИДРИНОВОГО КАУЧУКА Петрова Н.Н., Тимофеева Е.Н., Кузьмина Е.С.	398
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОМ ИДЕАЛЬНОЙ ТОЧКИ СОСТАВА СЫРЬЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ЗАГОТОВКИ Залазинский А.Г., Крючков Д.И., Титов В.Г.	400
РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМУФТОВОЙ СВАРКЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ В ТЕРМОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ Тихонов Р.С., Кондаков А.С., Старостин Н.П., Аммосова О.А.	401
ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ Адамов А.А., Торопицина А.В.	402
ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 40Х И ЭП517Ш ПРИ РАСТЯЖЕНИИ Третьяков М.П., Вильдеман В.Э.	403
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ, МИКРОПОР И МИКРОПРОСТРАНСТВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ РЕСТАВРАЦИЙ Коротин С.В., Третьяков М.П., Третьякова Т.В.	404
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРЕРЫВИСТОЙ ТЕКУЧЕСТИ НА ПРИМЕРЕ AL-MG СПЛАВА И УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ Третьякова Т.В., Зубова Е.М.	406

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НЕТКАНЫЕ МАТЕРИАЛЫ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИГИДРОКСИБУТИРАТА И КОМПЛЕКСА ЦИНКА С ТЕТРАФЕНИЛПОРФИРИНОМ Тюбаева П.М., Ольхов А.А., Карпова С.Г., Лобанов А.В.	408
НОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ, ОСНОВАННЫЕ НА АНАЛИЗЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А.	409
АНАЛИЗ РАБОТЫ МАТЕРИАЛОВ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ Каменских А.А., Устюгова Т.Н.	410
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ СО СФЕРИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ Файзуллин И.З., Мусин И.Н., Вольфсон С.И., Болонина А.М., Файзуллин А.З.	411
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ Феклистова Е.В., Вильдеман В.Э.	413
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В ОБРАЗЦАХ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ Филиппов А.В., Калашникова Т.А., Чумаевский А.В.	414
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ОСРЕДНЕНИЯ Филиппов А.А.	415
ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ЖИВУЧЕСТИ УЗЛА СОЧЛЕНЕНИЯ СТЕРЖНЕВОГО КАРКАСА Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф.	416
ПЕРСПЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Фортуна С.В., Колубаев Е.А., Елисеев А.А.	417
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ТРУБОПРОВОДА Хакимов А.Г.	418
СХОДИМОСТЬ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СЛАУ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ГЕТЕРОФАЗНОЙ СРЕДЫ Халевицкий Ю.В., Коновалов А.В., Партин А.С., Смирнов А.С.	419
АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТАВНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ Хачай О.А., Хачай А.Ю., Хачай О.Ю.	420
СИНТЕЗ АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СПЛАВОВ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ Витязь П.А., Сеньют В.Т., Хейфец М.Л., Колмаков А.Г., Клименко С.А.	421
ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В КОСОУГОЛЬНО АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТАХ В УСЛОВИЯХ СЖАТИЯ И РАСТЯЖЕНИЯ-СЖАТИЯ Паймушин В.Н., Холмогоров С.А., Каюмов Р.А.	422
ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАТАЦИИ АЗОТА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ Насыров В.Ф., Хуснимарданов Р.Н.	424
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МИКРОАНАЛИЗА В ДИАГНОСТИКЕ МАТЕРИАЛА ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ Царева И.Н., Бердник О.Б., Кириков С.В., Кривина Л.А., Тарасенко Ю.П.	426
ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОНИВЕЛИРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ НА ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ Епин В.В., Цветков Р.В., Шестаков А.П.	427

О ПРИРОДЕ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ Ст20 ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСОКИХ ВНУТРЕННИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ Неганов Д.А., Ценев Н.К.	428
РОЛЬ ДЕФЕКТОВ В ФОРМИРОВАНИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЮОН ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ Цуканов А.А., Псахье С.Г.	430
УПРОЧНЕНИЕ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНО-ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ Макаров А.В., Чалина М.А., Лежнин Н.В., Волкова Е.Г., Осинцева А.Л.	431
ОБЗОР МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА Воронин С.В., Коновалов С.В., Чаплыгин К.К.	432
МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ Чечулина Е.А., Трусов П.В.	434
МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 12Х18Н9Т, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ Чумаевский А.В., Калашникова Т.А., Филиппов А.В.	436
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛУЧА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ Чучкова Л.В., Ложкина Е.А., Овдина Д.С., Белов А.С.	437
ТЕОРЕТИКО-ПОЛЕВАЯ ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗЕРНАХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ Шавшуков В.Е., Ташкинов А.А.	438
РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ И УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ Шалковский Д.М., Петровцев А.В., Варфоломеев Д.А., Якимова М.Н., Дремов В.В., Козлов Е.А., Ширококов А.Е., Кучко Д.П., Юсупов Д.Т., Борщевский А.О., Павленко А.В., Малюгина С.Н.	440
КОРРЕЛЯЦИЯ СУБШЕРОХОВАТОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ Суслов А.Г., Шалыгин М.Г.	441
ВИБРОДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА УСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Быков А.А., Глот И.О.	442
МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ СТРУКТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Швейкин А.И.	443
ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В РЕЖИМЕ СТРУКТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ Швейкин А.И., Трусов П.В., Шарифуллина Э.Р.	445
ФОРМИРОВАНИЕ ДИССИПАТИВНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ ИЗНОСОСТОЙКИХ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ Филиппов М.А., Никифорова С.М., Швейкин В.П., Плотников Г.Н., Шарапова В.А.	446
ПОСТРОЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Цветков Р.В., Епин В.В.	447

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ШПАНГОУТА АВИАЦИОННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ОСНАЩЕННОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ Шипунов Г.С., Воронков А.А., Пеленев К.А., Шестакова К.Н.	448
ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОЛЛИМАТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ДИФРАКТОМЕТРА НА ВЕЛИЧИНУ ИЗМЕРЕННЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ Трофимов В.В., Ширяев А.А., Карманов В.В.	449
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВА МЕТОДОМ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОПКИНСОНА Гармашев А.Ю., Дегтярев А.А., Долгих С.М., Кленов А.И., Петров Д.В., Петухов Е.А., Сидоров К.С., Смирнов Е.Б., Шестириков М.А., Юсупов Д.Т.	450
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЛНЕ РАЗГРУЗКИ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т В ДИАПАЗОНЕ ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ 10–88 ГПА Юсупов Д.Т., Сидоров К.С., Гармашев А.Ю., Смирнов Е.Б., Вильданов В.Г., Слободенюков В.М., Борщевский А.О., Ткачев О.В.	451
СОЗДАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЯ С НАПЫЛЯЕМЫМ ПОКРЫТИЕМ Якимов А.К., Бутусова Е.Н.	452
СОЗДАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГРАНИЦ АЛМАЗ-МАТРИЦА И ЕЕ РОЛЬ В ПОВЫШЕНИИ СТОЙКОСТИ АЛМАЗНО-ТВЕРДОСПЛАВНЫХ КОМПОЗИТОВ Яковлева С.П., Шарин П.П., Акимова М.П.	453
ОСОБЕННОСТИ РОСТА ТРЕШИН В НЕКОТОРЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ Якупов Р.Р., Зайцев Д.В., Калачев В.А., Кочанов А.Н., Костандов Ю.А., Панфилов П.Е.	455
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ВЕКТОРНЫХ СВОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЭНЕРГИИ ДЕФЕКТА УПАКОВКИ Янц А.Ю., Трусов П.В.	456
АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С УЧЕТОМ ИЕРАРХИИ СТРУКТУР Бочкарева С.А, Гришаева Н.Ю, Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матольгина Н.Ю., Панин С.В., Реутов Ю.А.	458
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОМБИНИРОВАННЫХ ПАРАХ ТРЕНИЯ WC-(FE-MN-C)-СТАЛЬ Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Утяганова В.Р., Гнусов С.Ф.	460
ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ ПО СТАЛИ КОМПОЗИТА WC-СТАЛЬ ГАДФИЛЬДА Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Утяганова В.Р., Гнусов С.Ф.	461
ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ КЕРАМИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ И ПАРАМЕТРАМИ ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Утяганова В.Р., Саблина Т.Ю., Гнусов С.Ф.	462
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	463

Научное издание

Международная конференция
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»
сборник материалов (Екатеринбург, 21–25 мая 2018 г.)

Рекомендовано к изданию
Ученым советом ИМАШ УрО РАН

Ответственный за выпуск *Ю.В. Худорожкова*
Компьютерная верстка *А.В. Гариева*
Редактор: *И.М. Циклина*
Редактор англ. текста: *Е.Е. Верстакова*
Корректор: *Г.В. Торлопова*

ISBN 978-5-6040873-0-5



Подписано в печать 14.05.2018. Формат 60×84 1/16
Бумага писчая. Печать на ризографе. 52,60 п.л.
Тираж 300 экз.

Оригинал-макет изготовлен в
Научно-редакционном отделе ИМАШ УрО РАН.
620049 г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

Отпечатано в типографии
ООО «Издательство УМЦ УПИ»
г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2
Тел.: (343) 362-91-16, 362-91-17

