ФАНО РОССИИ
УрО РАН
ИМАШ УрО РАН
ИФПМ СО РАН
ИММ УрО РАН

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Екатеринбург
16-20 мая 2016 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
Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН

X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»

Сборник материалов

(Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г.)

Екатеринбург
ИМАШ УрО РАН
2016

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*
Матвеенко В.П. *Пермь, Россия*
Мену А. *Касабланка, Марокко*
Миховски М. *София, Болгария*
Морозов Н.Ф. *Санкт-Петербург, Россия*
Мулюков 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*

X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г. : сб. материалов. – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2016. – 385 с. – ISBN 978-5-7691-2439-6.

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.

Организатор конференции:
ФАНО России, УрО РАН, ИМАШ УрО РАН, ИФПМ СО РАН, ИММ УрО РАН, при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-20191 г)

ISBN 978-5-7691-2439-6

© ИМАШ УрО РАН, 2016

THE STRAIN STATE CALCULATION DURING THE MULTIPASS WIRE DRAWING

Loginov Yu.N.[1], Pervukhin A.E.[1], Babailov N.A.[2]

[1] *Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, e-mail: e-mail:* j.loginov@urfu.ru

[2] *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya st., 620049, Ekaterinburg, Russian Federation, e-mail:* babailov@imach.uran.ru

Objective: The aim of this work is the determination strain state during the multipass wire drawing (including non-ferrous metals and alloys) to identify the formation probability of micro-defects in the focus of plastic deformation.

Results: In the present work with research setting judgment it is made deformed state during the multipass wire drawing, including the comparison forms of the deformation zone. It was used the wire drawing software engineering analysis RAPID-2D to construct the mathematical model, which is developed in the Urals Federal University.

When analyzing the results of the calculations there are defined: the deformation zone form and the field strain rates. Also the paper identifies the conditions of plastic wire deformation depending on the number of the drawing passage. It was determined that according to the hardening of the metal wire in the deformation can appear two peaks instead of a single high strain rates (located on the axis of the drawing), which are offset relative to the drawing axis. In order to identify the danger of macropores it was taken into account to assess the occurrence of micro-defects in the metal billet and wire breakage.

The results showed that there are technological opportunities the drawing process such as compression and angles forming dies, whereby the conditions of the macropores formation are arise. It was established experimentally that in the first passage drawing it is advisable using large and small angles dies. And in the next pass there is necessary to apply small compression and large-angle die. However, these solutions are not universal, because they depend on the type of the hardening curve and deformable metal and the metal texture degree. Additional data on the phenomenon described above is the die angle of the working area, structure and metal texture state [1 – 4].

Conclusions: The practical value of this work is the finding of a possible appearance of the two deformation velocity distribution maxima in the fourth passage of the multiple wire drawing. It leads to the risk of the macro pores increasing, than the increased wire breakage. This breakage can occur immediately after the occurrence of macropores, and the accumulation of defects. The broken wires can occur in a few passages, there are the following ones: the transition from the rough regime to the middle regime of the drawing, or the thin to the drawn ones. This work was done within the state order on the subject No. 01201375904.

References

1. Логинов Ю.Н. Исследование влияния угла конусности волоки на механические свойства протянутого полуфабриката / Ю.Н. Логинов, П.Д. Василевский, Л.В. Радионов // Цветные металлы. – 2004. – № 6. – С. 104-106.

2. Логинов Ю.Н. Влияние угла рабочей зоны волоки на напряженное состояние в очаге деформации при волочении меди / Ю.Н. Логинов // Цветные металлы. – 2010. – № 3. – С. 94-97.

3. Логинов Ю.Н. Расчет деформаций и экспериментальное исследование текстуры в нагартованной медной проволоке / Ю.Н. Логинов, С.Л. Демаков, А.Г. Илларионов, М.С. Карабаналов // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 5. – С. 38-44.

INFLUENCE OF HIGH-INTENSITY TREATMENT BY IONS Zr FLOW ON IMPACT STRENGTH OF 12Cr1MoV STEEL

Panin S.V.[1,2,a], Maruschak P.O.[3,b], Vlasov I.V.[1,2,c], Sergeev V.P.[1,2,d]

[1]*Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation*
[2]*Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russian Federation*
[3]*Ternopol National Technical University, 56, Russkaya st., Ternopol, 46001, Ukraine*
e-mail: [a]svp@ispms.tsc.ru, [b]maruschak.tu.edu@gmail.com, [c]good0@yandex.ru, [d]vserg@mail.tomsknet.ru

The tightened requirements on the reliability of thermal power stations call for the necessity of accounting for the impact of operating conditions on material degradation, which in its turn is accompanied by the stiffening of the requirements for strength and cracking resistance of heatproof steels. The revealing of the regularities of dynamic fracture of a material under operational temperatures allows controlling these processes, prevent the fracture of structures, more reasonably treat the problem of predicting the durability at the stages of design and operation of parts used in thermal power equipment. The successful solution of such problem requires the implementation of pendulum impact testers to record diagrams of Charpy specimen under impact loading.

The increase of mechanical properties of materials through surface hardening is of prominent scientific and practical interest, since it enhances the life-time of machine parts and structural elements. At the same time, surface treatment of ferrite–pearlite steels usually does not lead to increased impact toughness of a material; however, it allows considerably increasing its wear resistance and fatigue durability.

In our recent studies a technique of highly intensive irradiation by Zr ion beam of 12Cr1MoV heat-proof steel was designed. It was shown that such treatment leads to the increase of ultimate tensile strength by 15 % and increase of fatigue life by 2–3 times. The study of the effect of such treatment on the impact fracture resistance under pendulum impact testing is of considerable interest. Thus, the aim of the present work is to investigate the effect of testing temperatures in the range of 20 C to 600 C on the mechanisms of impact fracture of 12Cr1MoV heatproof steel subjected to the preliminary ion beam vacuum arc treatment.

The performed analysis of the shape and values of the energy of Charpy specimen fracture made from 12Cr1MoV steel allowed identifying the stages of deformation and fracture processes in the temperature range from 20 C to 600 C. It was found that the surface and subsurface layers of the specimen play the major and functional role in plastic deformation and subsequent fracture of Charpy specimens. It was found that the heterogeneity of specimen structure modified by the ion beam treatment plays dominating role in plastic deformation and consequent impact fracture of Charpy specimens. They are connected with the following: localization of deformation processes, reduction of crack initiation energy, degeneration of shear lips. The basic regularities of testing temperature influence on the impact toughness of 12Cr1MoV steel were established.

ДИАГНОСТИКА ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА ТРУБОПРОВОДА ПО СОБСТВЕННЫМ ЧАСТОТАМ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Хакимов А.Г.

ФГБУН Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН,
д. 71, пр. Октября, г. Уфа, 450054, Российская Федерация, e-mail: hakimov@anrb.ru

Трубопроводы могут содержать на стенках отложения, например, в [1] приведен анализ эрозионно-коррозионного износа элементов трубопроводных систем на АЭС с РБМК-1000. Показано, что механизм эрозионно-коррозионного износа характеризуется тем, что одновременно с утонением стенок трубопроводов на одних участках происходит формирование отложений продуктов коррозии на других, а в [2] на основе уравнений и методов механики многофазных сред моделируются гидродинамические, теплофизические и тепломассобменные процессы, происходящие при течении природного газа в горизонтальном трубопроводе с учетом образующихся на внутренних стенках канала отложений газовых гидратов. Проведено численное исследование влияния некоторых факторов на процесс гидратообразования. Исследованию отложений парафина в трубопроводах, подвергаемых сезонной чистке посвящена работа [3]. Здесь исследуются собственные частоты изгибных колебаний трубопровода с продуктами коррозии на стенках и с жидкостью под давлением, находящейся под действием растягивающей силы. Решена обратная задача определения толщины стенки трубы и плотности продуктов коррозии на стенках трубопровода по двум собственным частотам изгибных колебаний. В процессе равномерной коррозии стенок трубопровода происходит уменьшение толщины стенок основного металла трубы и увеличение толщины продуктов коррозии на стенках трубопровода. Исследуются собственные частоты изгибных колебаний трубопровода с продуктами коррозии на стенках и с жидкостью под давлением, находящейся под действием растягивающей силы и защемленной по краям. Требуется определить плотность продуктов коррозии и толщину стенки трубы по собственным частотам изгибных колебаний. Предполагается, что продукты коррозии распределены по внутренней поверхности трубопровода равномерно.

На основе предложенной модели получено частотное уравнение, которое связывает параметры трубопровода, защемленного по краям, находящегося под действием растягивающей силы, имеющего продукты коррозии на стенках и жидкость под давлением. Решены прямая задача для определения первой и второй собственных частот изгибных колебаний трубопровода для заданных: плотности продуктов коррозии на стенках трубопровода, осевого усилия, толщины стенки трубы, давления внутри трубопровода, толщины равномерных отложений на стенке трубопровода и обратная задача по определению по двум собственным частотам изгибных колебаний трубы толщины стенки и толщины продуктов коррозии на стенках трубопровода.

Получено, что с увеличением толщины стенки трубопровода происходит увеличение собственных частот изгибных колебаний. С увеличением толщины продуктов коррозии на стенке трубопровода происходит уменьшение собственных частот изгибных колебаний трубопровода. По двум частотам изгибных колебаний можно определить толщину стенки и толщину продуктов коррозии на стенках трубопровода.

Литература

1. Бараненко В. И., Янченко Ю. А. Эрозионно – коррозионный износ элементов трубопроводных систем на АЭС с РБМК-1000 // Теплоэнергетика. – 2010. – № 5. – С. 26-33.

2. Мусакаев Н. Г., Уразов Р. Р., Шагапов В. Ш. Динамика образования гидратов при транспортировке природного газа // Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13, № 2. – С. 295-302.

3. Исследование отложений парафина в трубопроводах, подвергаемых сезонной чистке / Ван Вэньда, Хуан Цийу, Хуан Цзунь, Пан Цуань, Фу Цзунь, Ван Фенхуи. // Химия и технология топлив и масел. – 2014. – № 1 (581). – С. 27-33.

КРИТЕРИЙ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПОР ЛЭП

Семухин Б.С. [1,2], Тарасов А.Г. [3]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

[2]*Томский государственный архитектурно-строительный университет, д. 2, пл. Соляная, г. Томск, 634003, Российская Федерация, e-mail: bss@ispms.tsc.ru*

[3]*Новосибирский государственный технический университет, д. 20, пр-т К. Маркса, г. Новосибирск, 630092, Российская Федерация, e-mail: info@electrocorr.ru*

В настоящее время особенно актуальны проблемы технической диагностики работающих конструкций, эксплуатируемых длительное время на предельных режимах. Кроме того, существует объекты, где необходим регулярный тщательный контроль состояния материалов узлов, деталей и конструкций. Для технической диагностики широко используют известные акустические методы. Анализ литературных данных показывает, что все известные методы, строго говоря, могут использоваться только в том случае, если исследуемый объект находится в упруго деформированном состоянии, то есть напряжения в нем существенно меньше предела упругости. В этом случае практически любая задача допускает строгое аналитическое решение, сопоставление которого с экспериментальными данными дает корректный ответ на вопрос о распределении напряжений в объекте. Благодаря снижению исходных сечений от коррозии или износа, либо аномально высоких внешних воздействиях, напряжения в конструкциях и деталях могут выходить за указанную границу, и тогда возможно возникновение значительных пластических деформаций, часто не препятствующих дальнейшей безаварийной работе реальных объектов. Поэтому основной целью настоящей работы являлось установление связи изменения скорости ультразвука с основными прочностными характеристиками на примере металла опор ЛЭП, проработавших долгие годы и находящимся в упругопластическом состоянии, а также поиск критерия ресурса работы этих опор.

В настоящей работе изучена потеря устойчивости металлических элементов опор на макроуровне и связь ее с ветровым давлением. Показана высокая чувствительность УЗ метода к структурным изменениям в материале элементов опор и возможность оценки стадии «накопленной усталости» или её близости к критическому уровню. Установлены напряжения, действующие на элементы опор в зависимости от температуры металла и скорости ветра. Анализ эпюр напряжений позволяет осуществлять мониторинг состояния опор, работавших разное время, неразрушающим методом. Кроме того, метод оказался чувствительным к марке стали из которой были изготовлены опоры. Это позволило сравнивать опоры, сделанные из разных марок стали.

Результаты натурных измерений скорости ультразвука в элементах опор, полученные для опор проработавших многие годы, позволили построить зависимость ресурса работы от изменения скорости ультразвука. Анализ данной зависимости дает возможность количественной оценки уровня снижения срока службы элементов опор, типа поясных уголков, что критично в районах с высокими значениями ветрового давления. В работе предлагается критерий ресурса работы опор ЛЭП, основанный на прецизионных измерениях скорости распространения ультразвука в элементах опор. Выполненные исследования расширяют возможности использования ультразвукового метода для количественного определения напряжённого состояния металла опор ЛЭП при проведении их текущих, периодических и специальных осмотров. Достоверность таких измерений определяется хорошей воспроизводимостью физического воздействия и измерения возникающего эффекта, а также линейностью градуировочных зависимостей.

В качестве основного вывода можно утверждать, что скорость ультразвука является структурно чувствительной характеристикой и позволяет пересчитывать ее в основные механические напряжения для любого эксплуатационного состояния металла конструкций опор ВЛ.

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА КАЧЕСТВЕННЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕДИ

Железняк Л.М.[1], Бабайлов Н.А.[2]

[1] *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Институт материаловедения и металлургии, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация*
[2] *Институт машиноведения, Уральское отделение РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail:* babailov@imach.uran.ru

Целью работы является разработка технологии производства качественной заготовки из электротехнической меди с высоким уровнем физико-механических свойств.

В мировой и российской практике обработки цветных металлов широко применяются установки для получения медных непрерывно-литых заготовок (НЛЗ), предназначенных для изготовления прутков, профилей, проволоки. Однако даже при значительной степени холодной пластической деформации зерна НЛЗ измельчаются не полностью, в осевой зоне сохраняются вытянутые вдоль оси кристаллы (так называемый «шнур»), что снижает относительное удлинение и временное сопротивление разрыву готового профиля.

Требуемый уровень физико-механических свойств заготовок из электротехнической меди (для проводников тока, кабельной проволоки, контактных проводов воздушной сети городского и магистрального электротранспорта и др.) достигается по двум направлениям[1]:

- повышение пластичности металла в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного стыка путем измельчения зерна меди и модифицирования ее структуры при использовании волочильных станов, снабженных аппаратами электроконтактной сварки;
- применением термодеформационной обработки (ТДО) непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) обеспечен надежный перевод литой структуры в деформированную во всем ее объеме, исключено отрицательное влияние этой структуры на служебные свойства контактных проводов, повышена технологичность волочения.

Согласно разработанному нетрадиционному технологическому режиму [2] после электроконтактной сварки проводится осевая локальная горячая осадка ЗТВ с регламентированной степенью деформации при 810…870°С (т.е. в режиме отжига), предусмотренном конструкцией сварочного аппарата; образовавшееся местное утолщение снимается одним из широко известных способов. В результате улучшена структура ЗТВ, измельчены зерна меди, пластические и электротехнические свойства металла в этой зоне выведены на уровень основного металла заготовки.

Выводы: Реализован способ подготовки НЛЗ к волочению [3] с применением ТДО, включающей однократное, сонаправленное выходу заготовки из УГНЛ волочение с коэффициентом вытяжки 1,10…1,22 и отжиг при 700…780°С. Получен требуемый стандартом уровень механических свойств и электросопротивления, увеличена длина заготовок, ликвидирована обрывность, повышена производительность волочения.

Литература

1. Vasilevsky P.A., Zheleznyak L.M., Ivanov P.I., Emelyanova S.M. Improvement of copper semi-finished billet manufacture for electrical engineering purposes. Metallurgist. 2012. V. 56, Issue 3-4. P. 293-297.

2. Patent RU 2106215. Method for production of copper long blank / Krasikov A. E.; Konovalov A. V.; Zheleznjak L. M.; Khajkin B. E.; Ivanov P. I.; Svinin V. I. Publ. 1998-03-10.

3. Patent RU № 2146976. Method for preparing continuously cast copper billet for drawing / Vasilevskij P. A.; Zheleznjak L. M.; Kozlovskikh N. F.; Kotelnikov V. P.; Khajkin. B. E. Publ. 2000-03-27.

THE INDUSTRIAL RECYCLING OF TECHNOGENIC WASTES AND MINERAL PROCESSING

Polianskiy L.I.[1], Loginov Yu.N.[2], Pervukhina D.N.[2], Babailov N.A.[3]

[1] *JSC "Spidermash", 54 Studencheskaya, Ekaterinburg, 620049, Russian Federation, e-mail:* info@spidermash.ru
[2] *Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, e-mail:* j.loginov@urfu.ru
[3] *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya st., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation, e-mail:* babailov@imach.uran.ru

The purpose of this work is the development of theoretical and technological bases of the powder briquetting process (i.e. the rolling briquetting) and also the presentation of import-substituting technologies and equipment for the industrial recycling technological waste and the raw materials processing.

Results: Since 1991 to nowadays in the JSC “Spidermash” and the Ural Federal University with the Institute of Engineering Science there were developed theoretical bases of the compacting technological waste processes; briquette and pellet production technology by briquetting (i.e. rolling briquetting and stamping briquetting); the import-substituting technologies project and industrial equipment for the recycling of technological waste and the raw materials processing. The team mentioned above published 3 monograph, over 30 articles in the Russian and international journals. Technology and design of the roller presses are protected by the Russian Federation patents.

The rolling briquetting is the non-waste compaction process and it is no impact on the Environment. Also there is applied binder material (for example lime carbonate, liquid glass, etc.).

The project developed production lines waste and raw materials processing (http://spidermash.ru/): dust and slime of the ferrous and nonferrous metallurgy; scale rolling mills; metal shavings (including cast iron, aluminum and copper shavings); concentrates and tailings ores of ferrous and nonferrous metallurgy; limestone, dolomite and magnesia dust; dust and slime from the coal and coke and by-product process; fertilizers, pharmaceutical products, aluminum fluoride, cryolite, etc. There was developed equipment for the processing lines of the technological waste processing which includes equipment, they are the following ones: the roll briquetting presses, compactors, bins, dosers, tracks. Serial production of the roll briquetting presses (according to TU 3821-001-50316524-2004) capacity from 2 to 50 t / h is established.

Conclusions: In order to implement import substitution and more efficient use of waste of metallurgical and engineering industries are proposed to use the serial roll press manufactured by JSC "Spidermash" instead of American roller presses Ludman (assembled, for example, on the Ural Mining and Metallurgical Company), Ukrainian press of the "Ekoenergia" enterprise, Chinese roller presses and others.

References

1. Loginov Y.N., Bourkine S.P., Babailov N.A. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – T. 118, № 1–3. – C. 151–157.
2. Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Первухина Д.Н. Валковый пресс для брикетирования. Патент RU 146 458 U1. Заявка: 2014123913/02, 10.06.2014. Опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28.
3. Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Первухина Д.Н. Физическое моделирование валкового прессования при несимметричном воздействии на уплотняемый материал // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 3. – С.186–191.
4. Burkin S.P., Loginov Yu.N., Babajlov N.A. Modeling the roll briquetting of the granular materials // Steel in Translation. – 1997. – № 11. – C. 65–67.
5. Loginov Yu.N., Babailov N.A., Burkin S.P. Investigation of the distribution of briquette deformations in the cell of a briquetting press roll // Steel in Translation. – 1999. – T. 29, № 6. – C. 44–47.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НАПЛАВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

Коновалов С.В.[1], Кормышев В.Е.[1], Громов В.Е.[1], Иванов Ю.Ф.[2,3], Комиссарова И.А.[1], Сизов В.В.[1]

[1]*Сибирский государственный индустриальный университет, д. 42, ул. Кирова, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация, e-mail: konovserg@gmail.com*

[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация, e-mail: yufu55@mail.ru*

[3]*Институт сильноточной электроники СО РАН, д. 2/3, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

Методами современного физического материаловедения выполнено исследование формирования наплавочными методами износостойких покрытий на мартенситной стали марки Hardox 450. Наплавку осуществляли порошковой проволокой на основе Fe, содержащей 1,4% C, 1,0% V, 7,0% Cr, 8,0% Nb, 1,2% W.

Выполнены исследования фазового состава, дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств наплавленного металла. Установлено, что микротвердость наплавленного слоя в 2–2,5 раза, а износостойкость в 140–150 раз превышают эти же характеристики исходной стали.

Фазовый состав наплавленных слоев изучали методами рентгеноструктурного анализа. Установлено, что наплавка приводит к формированию многофазной структуры. Основной фазой (не считая α-фазы) в одинарной наплавке являются оксид железа состава Fe_3O_4. Основной фазой повторно наплавленного слоя являются карбиды на основе специальных элементов (карбиды Nb, W и Cr).

Дефектную субструктуру стали и повторно наплавленного металла анализировали методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Исследования основы выявили структуру, характерную для «мартенсита отпуска. Анализ структуры стали свидетельствует о присутствии в объеме зерен α-фазы кристаллов пластинчатой морфологии, сформировавшихся, очевидно, вследствие мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. В объеме и по границам кристаллов α-фазы выявляются частицы карбидной фазы (карбид железа, цементит). Кристаллы α-фазы фрагментированы, т.е. разбиты на слаборазориентированные объемы. На границах фрагментов также располагаются частицы карбидной фазы.

Наплавка, формируемая на поверхности стали, является многофазным материалом, основной составляющей которого является α-фаза. Индицирование микроэлектронограмм, полученных с мартенситной структуры, позволило выявить присутствие остаточного аустенита, располагающегося в виде протяженных прослоек по границам кристаллов мартенсита. В объеме кристаллов мартенсита обнаруживается дислокационная субструктура в виде многомерных сеток. В отдельных случаях в объеме кристаллов мартенсита обнаруживаются двойники превращения. В объеме и на границах кристаллов мартенсита обнаружены наноразмерные частицы второй фазы. Индицирование микроэлектронограмм, полученных с таких участков материала, показало, что данные частицы являются карбидом ниобия состава NbC. В отдельных случаях удается получить микроэлектронограммы с частиц субмикронных размеров. Индицирование таких микроэлектронограмм позволило выявить как рефлексы карбида $M_{23}C_6$ ($(Cr, Fe, W)_{23}C_6$), так и рефлексы карбида NbC. Следовательно, частицы субмикронных размеров в исследуемой наплавке могут быть как карбидами ниобия, так и карбидами более сложного состава.

Таким образом, показано, что повышенные физико-механические свойства наплавленного металла вызваны формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, упрочнение которой обусловлено мартенситной структурой α-матрицы и наличием высокой (более 50%) объемной доли включений оксидной и карбидной фаз.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00065).

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНА ВТ1-0 НА ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ, ПРИВОДЯЩЕЙ К УВЕЛИЧЕНИЮ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Комиссарова И.А.[1], Коновалов С.В.[1], Косинов Д.А.[1], Громов В.Е.[1], Мартусевич Е.В.[1], Иванов Ю.Ф.[2,3], Тересов А.Д.[2,3], Иванова О.В.[4]

[1]*Сибирский государственный индустриальный университет, д. 42, ул. Кирова, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация, e-mail: konovserg@gmail.com*

[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация, e-mail: yufu55@mail.ru*

[3]*Институт сильноточной электроники СО РАН, д. 2/3, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

[4]*Томский государственный архитектурно-строительный университет, д. 2, пл. Соляная, г. Томск, 634003, Российская Федерация*

Целью работы являлось исследование влияния электронно-пучковой обработки (ЭПО) технически чистого титана марки ВТ1-0, разрушенного в результате дальнейших усталостных испытаний, на изменение поверхности разрушения, фазового состава и состояния дефектной субструктуры.

ЭПО поверхности образцов, приготовленных к усталостным испытаниям, осуществляли на установке «СОЛО» при следующих параметрах: энергия электронов 16 кэВ; частота следования импульсов 0,3 $с^{-1}$; длительность импульса пучка электронов 150 мкс; плотность энергии пучка электронов 25 Дж/$см^2$; количество импульсов воздействия 3. Установлено, что ЭПО приводит к увеличению усталостной долговечности в 2,8 раз относительно необлученных образцов.

Исследования поверхности разрушения осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (Tesla BS-301). Анализ фазового состава и состояния дефектной субструктуры выполняли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (JEM-2100).

Выполнены исследования поверхности разрушения и дефектной субструктуры разрушенных при усталостных испытаниях образцов технически чистого титана. Показано, что облучение титана интенсивным электронным пучком приводит к формированию многослойной структуры. Слой толщиной ≈10 мкм, примыкающий к поверхности облучения, имеет исключительно пластинчатую структуру; нижележащий слой толщиной ≈10 мкм – имеет смешанную структуру, представленную пластинами и субзернами. Слой, расположенный на расстоянии (30-40) мкм от поверхности облучения (слой термического влияния), имеет преимущественно субзеренную структуру. Выполнены численные расчеты температурного поля, формирующегося в поверхностном слое титана, облученного интенсивным электронным пучком. Показано, что слой со структурой пластинчатой морфологии, примыкающий к поверхности облучения, сформировался в результате скоростной кристаллизации однофазного (жидкая фаза) состояния титана; лежащий под ним подслой с пластинчато-субзеренной структурой сформировался в результате скоростной кристаллизации двухфазного (жидкая фаза + твердая фаза) состояния; слой с субзеренной структурой является слоем термического влияния. Физической причиной многократного увеличения усталостной долговечности технически чистого титана марки ВТ1-0 является формирование пластинчатой субструктуры, обусловленное высокоскоростной кристаллизацией поверхностного слоя титана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-32-60048 мол_а_дк), гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (проект МД-2920.2015.8) и государственного задания № 3.1496.2014/К.

Тепловые расчеты и облучение технически чистого титана марки ВТ1-0 интенсивным электронным пучком на установке СОЛО были осуществлены за счет гранта РНФ (проект № 14-29-00091).

НАНОДИСПЕРСНЫЕ ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ ОКСИДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ФИНИШНОГО ПОЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Королева Л.Ф.

Институт машиноведения Уральского отделения РАН
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049 Российская Федерация

Для развития прецизионного машиностроения требуется качественная обработка поверхности металлов с получением шероховатости менее 0.005 мкм, что гарантирует необходимые эксплуатационные характеристики, надежность приборов и аппаратов. Как известно, процесс полирования представляет собой финишную операцию обработки поверхности металла и является комплексным взаимодействием обрабатываемого материала, полировальника, абразивных частиц пасты или суспензии и среды. Обычно для финишного полирования используют абразивные нанодисперсные материалы с высокой твердостью, например, наноалмазные порошки, как природные, так и синтетические, а также карбиды бора и кремния, кубический нитрид бора с зернистостью от 0,01 – 0,3 мкм до 6 – 10 мкм, а также корунд. При использовании этих материалов отмечается длительность и многостадийность процесса полирования.

Для того чтобы ускорить процесс полирования и получить поверхность металлов с наношероховатостью необходимо использовать трибохимически активные абразивные материалы, которые при механическом воздействии в результате трения инициируют химические превращения, ведущие к сглаживанию поверхности [1].

Финишное полирование металлов твердыми растворами оксидов представляет механохимический процесс, в котором имеют место механические и химические воздействия. В общем случае полирование является многоцикловым механическим процессом, осуществляемым путем трения под давлением на поверхность полируемого тела в присутствии полировальной пасты. Учитывая, что под действием частиц абразива происходит упругопластическая деформация, вызывающая изменение физико-химических свойств тонких подповерхностных слоев металла, в том числе изменение термодинамического и химического потенциалов и окисление поверхностного слоя, то процесс более правильно назвать механохимическим. К факторам, определяющим химию процесса, следует отнести химическую активность полировальной пасты или абразивного материала, выраженную через константу скорости окисления и снятия поверхностного слоя, глубину окисления поверхностного слоя или толщину оксидной пленки.

Эти процессы можно отнести к физико-химической механике. Трибохимически активными материалами являются твердые растворы оксидов переходных металлов, например, на основе оксидов алюминия [2].

Литература

1. Koroleva L. F. Final Polishing of Metals to Obtain Nanoroughened Surface // Nanotechnologies in Russia. – 2012. – Vol. 7, no. 1–2. – P. 67–75.

2. Королева Л. Ф. Абразивные свойства нанодисперсного оксида алюминия-железа // Неорган. материалы. – 2009. – Т. 45, № 10. – С. 1235–1242.

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ ПАНОРАМНОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Осипенко Н.М., Попов А.Л., Челюбеев Д.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), д. 101, корп. 1, пр-т Вернадского, г. Москва, 119526, Российская Федерация, e-mail: popov@ipmnet.ru

Представлена ранее запатентованная [1, 2] методика и оптическая схема 3-D спекл-интерферометрии нормальных перемещений исследуемой поверхности тела. На Рис. 1,*a* приведена оптическая схема интерферометра, обеспечивающая одновременную регистрацию на одной спекл-интерферограмме перемещений лицевой, боковых и тыльной поверхностей образца, а на Рис. 1,*b* – характерная интерферограмма образца в форме прямоугольного параллелепипеда, в центре которой отображаются перемещения двух передних граней, а по бокам – перемещения задних граней параллелепипеда, размещённого, как показано на Рис. 1,*a*.

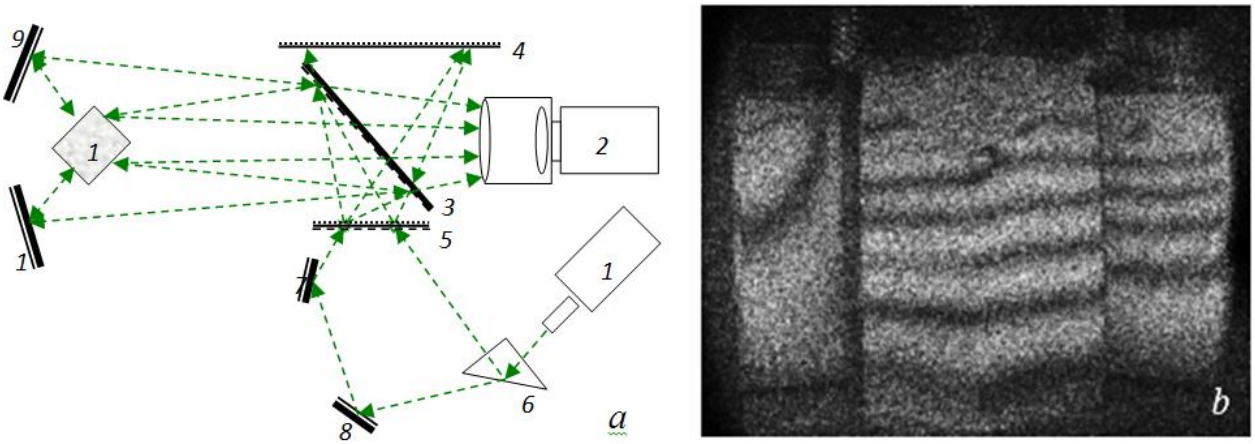


Рис. 1.

Цифрами на Рис. 1,*a* обозначены: *1* – лазер, *2* – видеокамера, *3* – полупрозрачное зеркало, *4* – диффузный отражатель, *5* – матовое стекло, *6* – делительная призма, *7–10* – зеркала, *11* – образец; пунктирными стрелками показан ход лучей. Интерферограмма на Рис.1,*b* получена в процессе продольного сжатия в прессе ДТС-06-100 образца, изготовленного из гипса, сечением 25x25 мм и высотой 50 мм. На ней видны характерные особенности линий уровня поля перемещений, выражающиеся в числе, положении и конфигурации интерференционных полос. При испытании образцов с искусственно созданными дефектами на интерферограммах проявляются также особенности, указывающие на незаметные невооруженным глазом области будущего разрушения.

На основании полученных интерферограмм могут быть построены формы поперечных отклонений боковых поверхностей образцов на каждой стадии нагружения. Одновременный съём информации о поле перемещений со всех доступных для наблюдения сторон образца открывает возможность для дилатометрических расчётов по любым парам точек, взятым на этих сторонах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-01-00869).

Литература

1. Гольдштейн Р. В., Козинцев В. М., Подлесных А. В., Попов А. Л., Солодовников С.И., Челюбеев Д.А. Способ дилатометрии. Пат. 2559797 РФ, 2015, бюл. № 22, 6 с.

2. Гольдштейн Р. В., Козинцев В. М., Попов А. Л., Солодовников С. И., Челюбеев Д. А. Интерференционный дилатометр. Пат. 153452 РФ, 2015, бюл. № 20, 2 с.

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ СТРУКТУРНЫЙ ПЕРЕХОД И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВАХ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В.

Алтайский государственный университет, д. 61, пр. Ленина, г. Барнаул, 656049, Российская Федерация, e-mail: plotnikov@phys.asu.ru

Эксперименты по деформированию поликристаллов алюминия и других металлов и сплавов в широком интервале температур свидетельствуют, что в ходе нагружения накопление деформации осуществляется двояким образом: монотонным путем, когда на зависимости деформации от времени (температуры) процесса отсутствуют события, нарушающие монотонность; немонотонным путем, когда на этой зависимости наблюдаются макроскопические деформационные скачки. Эти особенности деформационного поведения металлов коррелируют с акустической эмиссией, сопровождающей процесс накопления деформации при высоких температурах: монотонное накопление деформации сопровождается низкоамплитудной акустической эмиссией; скачкообразное накопление деформации характеризуется высокоамплитудными единичными сигналами акустической эмиссии.

В работе проведены исследования накопления деформации и акустической эмиссии в АМг6 сплаве в условиях термомеханического нагружения по двум схемам: неизотермически - непрерывным нагревом начиная от 25 °С и до 500 °С; изотермически – линейно возрастающей нагрузкой.

В условиях термомеханического нагружения АМг6 сплава наблюдается два участка накопление деформации (область I, область II). В низкотемпературной области I в температурном интервале 20 – 400 °С монотонному накоплению деформации величиной примерно 5 % соответствует акустическая эмиссия, характеризуемая монотонным нарастанием среднеквадратического напряжения акустической эмиссии при нагреве. В высокотемпературной области II при температуре около 400 °С ($T_{гр}$) характер накопления деформации и акустической эмиссии меняется: быстрому накопления деформации соответствует активный рост амплитуды среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии. Это может свидетельствовать, что в области II после 400 °С активизируется новый механизм накопления деформации, который становится основным.

Температурная точка перехода от низкотемпературной области I к высокотемпературной области II определяет переход от низкоскоростного накопления деформации к высокоскоростному. Скорость накопления деформации в первом температурном интервале (в области I) почти в четыре раза меньше скорости накопления в области II. Переход из области I в область II можно трактовать как деформационный структурный переход.

Деформационный структурный переход, представляет собой смену накопления деформации, контролируемый термически активируемым переползанием дислокаций, на процесс накопления, контролируемый процессом производства дислокаций на тройных зернограничных стыках в ходе зернограничного проскальзывания и происходит тогда, когда температурно-силовые параметры и колебательная энергия акустической эмиссии в деформируемом объеме достигают критических значений.

Таким образом, деформационный структурный переход есть результат совместного действия термических флуктуаций, механических напряжений, определяющих величину статических смещений атомов, и колебательной энергии акустической эмиссии, определяющей величину динамических смещений атомов в элементарном деформационном акте. Очевидно, производство полных дислокаций при активации зернограничного проскальзывания позволяет обеспечить значительное увеличение скорости накопления деформации в области II.

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОКОВОК В САПР ТЕХНОЛОГИИ КОВКИ ВАЛОВ НА ПРЕССАХ

Канюков С.И., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю.

Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620042, Российская Федерация e-mail: avk@imach.uran.ru

Рассмотрена концепция управления качеством проработки металла поковок в зависимости от поставленных нечетких целей на примере расчета размеров осаженного слитка при автоматизированном проектировании технологии ковки валов на прессах.

При ковке валов на прессах основным показателем качества проработки металла является степень его деформации за весь процесс обработки, которую принято называть уковом. Для улучшения структуры металла в этом случае обычно применяют операцию осадки выбранного слитка, из которого затем куется заданная поковка и от размеров которого зависит значение укова этой поковки.

На практике при решении подобных задач обычно преследуют достижение сразу несколько целей. В рассматриваемом примере это формулируется следующим образом: необходимо рассчитать диаметр осаженного слитка при условии максимальной проработки металла при осадке и одновременно минимальной трудоемкости изготовления поковки, при этом значение общего укова должно находиться в заданных пределах. Решение поставленной задачи в такой «расплывчатой» постановке может быть успешно получено с использованием нечеткой теории принятия решений, когда цели заданы нечеткими множествами.

В рамках рассматриваемой задачи сформулированы преследуемые цели, введены и формализованы понятия функций принадлежности решений этим целям, приведены примеры различных решений задачи расчета размеров осаженного слитка с учетом относительной важности поставленных целей.

Предложенный подход позволил реализовать в САПР технологии ковки валов на прессах управление качеством проработки металла и может быть использован для разработки алгоритмов и программ автоматизированного проектирования технологии ковки других видов поковок.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН, проект №15-7-1-9 в части применения нечеткой теории принятия решений в условиях неопределенности.

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ С УЧЕТОМ СКОРОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Соловей В.Д.[1], Логинов Ю.Н.[2], Пузанов М.П.[2]

[1] *Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: SoloveiVD@yandex.ru*

[2] *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация, e-mail: unl@mtf.ustu.ru*

Цель исследования – оценить математическими методами изменение величины сопротивления деформации σ_s электротехнической стали при холодной прокатке с учётом эффекта скоростного упрочнения.

Сведения о сопротивлении деформации электротехнической (трансформаторной) стали типа Fe-3%Si имеют противоречивый характер. Так, в справочнике [1] сопротивление деформации сплава Fe-3% Si представлено монотонно возрастающей степенной функцией. В публикации [2], участок пластической деформации стали Fe-3% Si имеет зуб текучести, а далее представляет собой практически линейно возрастающую функцию. Данные ЦНИИИТЭИЧМ [3] показывают существенно большее упрочнение. В работе [4] получены диаграммы растяжения стали Fe-3% Si при различных скоростях деформации. Были выявлены вязкие свойства стали при холодной деформации в диапазоне скоростей деформации 0,00015…1,10 $с^{-1}$.

Согласно промышленным данным вторая холодная прокатка трансформаторной стали ведётся за один проход с начальной толщины h_0 = 0,70 мм до конечной h_1 = 0,26 мм, величина относительной деформации ε = 62,86 %, скорость выхода металла из валков v_1 = 3,65 м/с, линейная скорость валков $v_в$ = 3,37 м/с, диаметр рабочих валков $D_в$ = 290 мм. Среднюю скорость деформации рассчитали по формуле Тринкса $\xi_{ср}$ = 265 $с^{-1}$.

По данным работы [4] были построены кривые упрочнения сплава Fe-3% Si, аппроксимированные затем степенными функциями. По аппроксимирующим функциям определили значения σ_s при ε = 62,86 % для разных скоростей деформации. Далее, по расчётным значениям методом экстраполяции было определено значение сопротивления деформации при $\xi_{ср}$ = 265 $с^{-1}$. Функцию экстраполяции назначали в соответствии с формулой А. Надаи [1]: $\sigma_s = 1075{,}8+13{,}328\cdot\ln(\xi)$. В результате вычислений для $\xi_{ср}$ = 265 $с^{-1}$ получено σ_s = 1131 МПа. В тоже время σ_s = 1077 МПа при $\xi_{ср}$ = 1,10 $с^{-1}$, ε = 62,86 %.

С учётом скоростного упрочнения расчётное значение σ_s трансформаторной стали при холодной прокатке превышает значение, прогнозируемое по диаграмме на 5 %. Близкие результаты были получены в работе [6] для TWIP-стали. В дальнейшем для сплава Fe-3% Si предполагается экспериментально проверить результат математической оценки.

Литература

1. Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: справочник. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.

2. Hug E., Hubert O. Van Houtte J. J. Effect of internal stresses on the magnetic properties of non-oriented Fe–3wt.% Si and (Fe,Co)–2wt.% V alloys // Materials Science and Engineering A. –2002. – Vol. 332. – P. 193–202.

3. Механические свойства электротехнических сталей. / В. Г. Борисенко, Э. П. Венцкович, Е. А. Курганова и др. // Серия 12 – Металловедение и термическая обработка. – Вып. 4. – М. : ЦНИИИТЭИЧМ, 1973. – 20 с.

4. Соловей В. Д. Пластичность и вязкость сплава Fe + 3% Si // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 6. – С. 58-61.

5. Durrenberger L., Molinari A., Rusinek A. Internal variable modeling of the high strain-rate behavior of metals with applications to multiphase steels // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 478. – P. 297–304.

CRYSTAL PLASTICITY MODEL FOR THE DEFORMATION BEHAVIOR OF ALUMINUM SINGLE CRYSTALS

Batukhtina E.E.[1], Romanova V.A.[1], Balokhonov R.R.[1,2], Shakhidjanov V.S.[3]

[1]*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4 Akademicheskii pr., Tomsk, 634021, Russian Federation, e-mail: batuhtina10902@mail.ru*

[2]*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation*

[3] *National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation*

Due to a favorable combination of high strength and low weight, advanced aluminum alloys are of great interest for applications in automobile and airspace industries. The important scientific and engineering problem is to predict the deformation behavior of aluminum parts and structures under loading.

Along with experimental methods, numerical simulation approaches are widely used to study the material behavior on different scales, with the construction of multiscale constitutive models being overriding priority of modeling. An accurate approach to describe single crystal behavior requires for the elastic and plastic anisotropy to be accounted for. In this paper, the elastic response of aluminum single crystals is calculated in terms of an anisotropic elasticity model. The plastic behavior of the fcc single crystals is described by crystal plasticity theory [1], basing on Schmid's law. According to this approach, plastic strains are calculated as a summary slip over all active slip systems. A slip system becomes active provided that the resolved shear stress here reaches a critical value.

Finite-element calculations for uniaxial compression of single crystals with different crystallographic orientations have been performed. The boundary-value problem was solved using ABAQUS/Explicit software. The effect of crystallographic orientation on the plastic strain localization was investigated. Model verification has been done by comparison of calculation results with experimental data.

This work is partially supported by research grants of Russian Foundation for Basic Research (14-08-00277-a and 16-01-00469-a).

References

1. Jörg Schröder, Klaus Hackl Plasticity and Beyond: Microstructures, Crystal-Plasticity and Phase Transitions/ Jörg Schröder, Klaus Hackl – Berlin : Springer, 2014. – 550 p.

FINITE-ELEMENT SIMULATION OF SCRATCHING A COATED BRITTLE PLATE

Ogorodnikov A.I.

Ural Federal University, 19 Mira Str., Ekaterinburg, 620002 Russian Federation
e-mail: Al.Ogorodnikov@bk.ru

Scratching is a general method both for investigating behavior of brittle materials [1] and dividing silicon wafers into separate dies in electronics and semiconductor industry [2]. Micro and nano scratch experiments usually provide information on mechanism of material removal, which is helpful for choosing the machining parameters. Scribing, dicing, polishing and grinding are the principal treatment techniques not only for electronics but also for optical devices and solar cells. The separation process consists of preliminary scribing a surface by diamond tools and followed by mechanical breaking. However, the behavior of a surface film during such operation is little studied. The objective of this work is to simulate this process.

Zinc sulphide (ZnS) coating was taken for simulation of internal stresses near the wafer surface under force loading. ZnS can be coated on the silicon wafer as anti-reflecting film to reduce the amount of sunlight lost in a solar cell or as infrared-transparent optical window. Scribing of the silicon wafer was represented as a special case of cutting in the simulation. Some minor cutting differences for silicon were included in the model. The depth of cut, the scratch width and the tangential component of cutting force were derived from the predetermined normal force and also from the geometry of the tool tip and material properties.

The 3D simulation of cutting for silicon wafer has being done with use of finite element method. APDL (ANSYS Parametric Dynamic Language) programming in FE software package ANSYS has been used to solve this simulation task. The initial geometry is constructed by means of ANSYS preprocessor and consists of silicon plate glued to flexible film and diamond tool. Loading and constraints include Z-fixed support along lower film surface and Z-axis force applied to upper surface of tool. Z-axis coincides with gravity direction and normal force loading on tool. Y-axis coincides with scratch line. Special top layer of the plate is intended for analysis of coating behavior and permits different values of contact cohesion. ZnS is a soft material and as coating it reduces the level of internal stresses in a silicon during cutting. Compressive stresses sharply concentrated in 5-μm-thick layer under force load of 0.1 N while tensile stresses observed directly in silicon.

In our work we have done 3D simulation of brittle plate with a thin film on its surface through finite element method. Simulation techniques enhance understanding of cutting problems and promote further development of existing separation techniques.

References

1. Ogorodnikov A. I., Ogorodnikova O. M., Tikhonov I. N. Simulation of defect zones in scribed silicon wafers // Materials Science and Engineering: IOP Conf. Series. – 2010. – Vol. 15. – P. 012046.

2. Cutter for splitting brittle sheet blanks / A. I. Ogorodnikov, Yu. N. Zhukov, E. E. Tikhonov, K. M. Savinykh // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35. – P. 413–416.

НАВОДОРАЖИВНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Пугачева Н.Б.

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

Наводораживание металлических конструкций является опасным явлением, поскольку может привести к их преждевременному разрушению. В некоторых случаях эти разрушения носят катастрофический характер и приводят не только к уничтожению конструкции, но и представляют угрозу жизни и здоровью людей. Явление наводораживания проявляется в проникновении водорода в сталь или сплав, скопление его вблизи дефектов кристаллического строения, вовлечение в химические реакции при нагреве, в результате которых внутри сплава создаются сверхвысокие давления, разрывающие материал. Цель данного исследования заключалась в оценке степени наводораживания элементов различных конструкций, эксплуатируемых в разных условиях.

Первая группа материалов используется для изготовления конструкции рекуператора подогрева воздуха шахтной печи для плавки никелевой руды, средние рабочие температуры которого составляют 600 °С при возможных забросах до 1100 °С. Исследования материала кожуха рекуператора из аустенитной коррозионностойкой стали марки 201 AISI показали, что внутри фрагмента наблюдаются пустоты, которые соответствуют макродефектам, называемым флокенами, с кристаллическими, окисленными внутренними матовыми поверхностями без металлического блеска. Газовая среда внутри коллектора рекуператора содержит до 20 об. % CO_2, до 10 об. % CO, 4,5 об. % H_2O. При нагреве эти соединения активно взаимодействуют друг с другом и поверхностью стального кожуха рекуператора, поэтому вполне возможно наводораживание материала кожуха.

Вторая группа исследованных материалов используется для элементов конструкций нефтедобычи: буровые вышки, насосно-компрессорные трубы и соединительные муфты, для которых рабочими являются климатические температуры. Тем не менее, в процессе эксплуатации признаки наводораживания в виде внутренних микроразрывов наблюдали в сварных соединениях буровой вышки (углеродистая сталь марки 20), насосно-компрессорных трубах и соединительных муфтах к ним (конструкционная сталь 40Х). Появление внутренних микроразрывов снижает ударную вязкость и конструкционную прочность, что может послужить причиной разрушения конструкции.

Проведенные исследования показали возможность водородного охрупчивания элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях агрессивных водородосодержащих сред не только при повышенных, но и при климатических температурах. При выборе материалов для таких конструкций следует руководствоваться их склонностью к наводораживанию, а также рассмотреть комплекс мер по предотвращению водородного охрупчивания как за счет очистки газовых сред, изменения технологических параметров эксплуатации, сокращения максимально допустимого срока эксплуатации с более частой замене элементов конструкций на новые, так и за счет разработки программ мониторинга с привлечением приборов неразрушающего контроля.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ AL/SIC НА ХАРАКТЕР КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Пугачева Н.Б. [1], Сенаева Е.И.[2]

[1]*Федеральное государственное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, д.34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

[2]*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», e-mail: nata5-4@yandex.ru*

Металломатричные композиционные материалы (ММК) все более привлекают внимание исследователей благодаря высоким показателям тепло- и электропроводности в сочетании с повышенными прочностными характеристиками и малым удельным весом. Они представляют интерес для использования в авиационной и ракетной техники, в химическом и электротехническом машиностроении. Одной из важных характеристик ММК является коррозионная стойкость, исследованию которой до сих пор практически не уделяли внимания. Многообразие существующих методов получения ММК определяет разнообразие их структур. Интерес представляет определить влияние типа структур композитов на особенности их коррозионных повреждений.

Были проведены ускоренные сравнительные коррозионные испытания образцов ММК Al/SiC с равномерным и сетчатым распределением наполнителя SiC в алюминиевой матрице. Испытания проводили методом полного погружения образцов в 3 %-ный водный раствор хлористого натрия с добавлением 0,1 % перекиси водорода при комнатной температуре в соответствие с требованиями ГОСТ 9.913-90. Тип и показатели коррозии определяли в соответствие по ГОСТ 9.908-85. Степень коррозионных повреждений оценивали по изменению удельной массы образцов по формуле:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_i}{S_0}, \quad (1)$$

где Δm – удельное изменение массы образца, мг; m_0 – начальная масса образца, мг; m_i – конечная масса образва, мг; S_0 – начальная площадь поверхности образца, мм^2. Кроме того рассчитывали глубину коррозии по изменению толщины образцов по формуле:

$$a_k = \frac{a_0 - a_i}{2}, \quad (2)$$

где a_k – глубина коррозии, мм; a_0 – начальная толщина образца, мм; a_i – конечная толщина образца, мм. Скорость коррозии (V), определенная по формуле:

$$V=(a_k+h)/\tau, \quad (3)$$

где h – глубина внутренних коррозионных повреждений в мм, определяемая металлографически на поперечных шлифах, τ – длительность испытаний в часах.

Рассмотрены два разных типа структуры ММК: первый - с равномерным распределением наполнителя и второй – с сетчатым распределением частиц наполнителя, когда они сосредоточены по границам зерен металлической матрицы. Показано, что коррозионные процессы развиваются сначала на поверхности с образованием тонкой защитной пленка оксида Al_2O_3. Эта пленка может скалываться, а на месте скола образуется новая. Эти процессы происходят в течение первых 240 часов испытаний. Затем преобладает окисление границ раздела между матрицей и наполнителем в подповерхностном слое, развивается подповерхностная коррозия, переходящая с течением времени в язвенную. Показатели коррозии Δm, a_k и V в большей степени изменились для композитов с равномерным распределением наполнителя, что связано с большей протяженностью границ раздела между наполнителем и матрицей.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 14-19-01358.

МЕТОДИКА ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ТЕНЗОМЕТРИИ

Степанова Л.Н.[1], Чернова В.В.[2]

ФГБУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», д. 191, ул. Дуси Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация,
e-mail: [1] stepanova@stu.ru; [2] chernova.vv@yandex.ru.

При разработке современных объектов транспорта используются композиционные материалы (КМ). Дефекты в композиционных конструкциях возникают как в процессе эксплуатации, так и при их изготовлении. Поэтому требуются методики, позволяющие выполнять мониторинг конструкции без вывода ее из эксплуатации и выявлять дефекты на ранних стадиях развития. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля (НК) конструкций из КМ является акустическая эмиссия (АЭ). Однако анизотропность КМ затрудняет определение времен прихода сигналов АЭ на датчики пьезоантенны, что повышает погрешность определения координат дефектов.

Цель работы – разработка методики локации дефектов при прочностных испытаниях образцов и конструкций из углепластика с использованием метода АЭ и тензометрии.

При разработке методических вопросов учитывалось влияние анизотропии на форму сигналов АЭ. Были проведены прочностные испытания образцов из различных углепластиков (Т700 и КМКУ) с регистрацией АЭ- и тензометрической информации в режиме реального времени. При этом определялась разрушающая нагрузка, деформация материала образцов, фрактография зоны разрушения, координаты дефектов и основные информативные параметры сигналов АЭ.

Разработанная методика с использованием вейвлет-преобразования позволила определять структурный коэффициент, связывающий изменение структуры сигналов АЭ с типом разрушения материала композита. При статических испытаниях образцов из углепластика Т700 области разрушения локализовались при нагрузках, не превышающих 30 % от разрушающих. При этом видимые дефекты визуально не выявлялись. Для повышения точности локации зоны разрушения применен модифицированный табличный метод определения времен прихода сигналов АЭ на датчики пьезоантенны.

Проведены циклические испытания образцов из углепластика Т700 с различными типами укладки монослоев и концентратором напряжений в виде отверстия. Образцы испытывались на предельных нагрузках, составляющих (70–80) % от разрушающих, определенных при статических испытаниях образцов данного типа укладки и таких же геометрических размеров. Был зарегистрирован большой объем АЭ-информации, что усложнило процесс ее обработки. Для решения данной задачи предложено использовать двухэтапную кластеризацию, позволяющую сократить время обработки информации более, чем в 100 раз, и разделять сигналы АЭ по источникам, соответствующим разрушению, как в области концентратора напряжений, так и в области захватов.

Предложенная методика локации и обработки сигналов АЭ использовалась в процессе автоматического контроля за состоянием конструкций из КМ.

Выводы

1. При использовании метода АЭ и тензометрии при прочностных испытаниях образов и конструкций из углепластика выявлены дефекты на ранней стадии развития и определены в реальном времени координаты зон разрушения.

2. Использование разработанных методик позволило повысить точность локации сигналов АЭ, проводить анализ изменения их структуры и сократить время обработки АЭ-информации.

О ПОСТРОЕНИИ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ КРАЕВЫХ РЕЖИМАХ С ВЫРОЖДЕНИЕМ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ

Спевак Л.Ф.[1], Казаков А.Л.[2]

[1]*ИМАШ УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620034, Россия;*
[2]*ИДСТУ СО РАН, 134, ул. Матросова, Иркутск, 664033, Россия*

В работе рассмотрены одномерные краевые задачи для нелинейного уравнения теплопроводности со степенной зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры,

$$u_t = uu_{xx} + \frac{1}{\sigma} u_x^2, \quad (1)$$

для двух видов краевых условий:

$$u\big|_{x=0} = f(t),\ f(0) = 0,\ f'(0) > 0; \quad (2)$$

$$u\big|_{x=a(t)} = u_0(t,x)\big|_{x=a(t)} = g(t), a(0) = 0,\ g(0) = 0. \quad (3)$$

Легко видеть, что в момент времени $t = 0$ множитель при старшей производной u_{xx} обращается в нуль, т.е. имеет место вырождение задачи.

Алгоритмы решения задач (1), (2) и (1), (3), предложенные авторами в работах [3, 4] позволяют по шагам по времени строить непрерывные по пространственной переменной решения с достаточной точностью. Стоит отметить, однако, что, в отличие от задач с заданным нулевым фронтом, для условий (2) или (3) при построении решения на каждом шаге область решения задачи неизвестна и определяется в ходе итерационного процесса. Это приводит к отсутствию стабильной сходимости процесса, а для некоторых функций $f(x)$ или $g(x)$ даже к невозможности корректного решения на достаточночно продолжительном промежутке времени. Чтобы избежать этой проблемы, в данной работе предложен новый алгоритм, основанный на замене местами искомой функции и пространственной переменной. Уравнение (1) и краевые условия (2), (3) в этом случае приводятся к виду

$$x_t x_u^2 = ux_{uu} - \frac{x_u}{\sigma}, \quad (4)$$

$$x\big|_{u=f(t)} = 0, \quad (5)$$

$$x\big|_{u=g(t)} = a(t). \quad (6)$$

С помощью построенных для решения задач (4), (5) и (4), (6) алгоритмов были решены ряд задач. Анализ полученных результатов и сравнение полученных решений с известными точными решениями показали устойчивую сходимость итерационных процессов и лучшую по сравнению с ранее разработанными алгоритмами точность решения.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 16-01-00608.

Литература

1. Vazquez J. L. The Porous Medium Equation: Mathematical Theory. - Oxford Press. 2006, 648 p.
2. Сидоров А. Ф. Избранные труды: Математика. Механика. – М. : Физматлит. 2001, 576 с.
3. Казаков А. Л., Спевак Л. Ф. Методы граничных элементов и степенных рядов в одномерных задачах нелинейной фильтрации // Известия Иркутского государственного университета. –2012. – №2. – С. 2–18.
4. Kazakov A. L., Spevak L. F. Numerical and analytical studies of a nonlinear parabolic equation with boundary conditions of a special form // Applied Mathematical Modelling. – 2013. – Vol. 37, iss. 10-11. – P. 6918–6928.

РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ВЫРОЖДЕНИЕМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДВОЙСТВЕННОЙ ВЗАИМНОСТИ

Спевак Л.Ф., Нефедова О.А.

ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация,
e-mail: lfs@imach.uran.ru , nefedova@imach.uran.ru

Работа посвящена разработке алгоритма решения двумерных краевых задач для нелинейного дифференциального уравнения параболического типа с вырождением [1, 2]:

$$u_t = u\Delta u + \frac{1}{\sigma}(\nabla u)^2 . \quad (1)$$

Важной особенностью уравнения (1) является вырождение параболического типа при $u = 0$. Рассматривается краевая задача для этого уравнения при заданном нулевом фронте тепловой волны, впервые сформулированная в работах А.Ф. Сидорова [2]. Численные алгоритмы для решения подобных задач в случае одной пространственной переменной разработаны ранее в работах [3, 4]. В данной работе этот же подход развит на случай двух пространственных переменных. Краевое условие в двумерном случае имеет вид:

$$u\big|_{b(t,x_1,x_2)=0} = 0 , \quad (2)$$

Можно показать, что при выполнении условия (2) справедливо соотношение для потока

$$q\big|_{b(t,x_1,x_2)=0} = \frac{\sigma b_t(t,x_1,x_2)}{\sqrt{b_{x_1}^2(t,x_1,x_2) + b_{x_2}^2(t,x_1,x_2)}} . \quad (3)$$

Для решения задачи (1) – (3) на заданном промежутке времени был разработан пошаговый алгоритм, основанный на методе граничных элементов с применением метода двойственной взаимности [5]. Решение проводилось с использованием аналитического вычисления интегралов по граничным элементам [6].

Ключевым вопросом эффективности разработанного алгоритма является выбор системы радиальных базисных функций (РБФ) при применении метода двойственной взаимности. Для анализа применения различных видов РБФ построенный алгоритм был реализован в виде программы. Анализ проводился на основе сравнения результатов расчетов с известными точными решениями. Определены наиболее подходящая для рассматриваемого типа задач система функций и их параметры.

Работа выполнена при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН, проект № 15-7-1-17.

Литература

1. Vazquez J. L. The Porous Medium Equation: Mathematical Theory. – Oxford Press. 2006, 648 p.
2. Сидоров А. Ф. Избранные труды: Математика. Механика. – М. : Физматлит. 2001, 576 с.
3. Kazakov A. L., Spevak L. F. Numerical and analytical studies of a nonlinear parabolic equation with boundary conditions of a special form // Applied Mathematical Modelling. – 2013. – Vol. 37, iss. 10-11. – P. 6918–6928.
4. Kazakov A. L., Spevak L. F. An analytical and numerical study of a nonlinear parabolic equation with degeneration for the cases of circular and spherical symmetry // Applied Mathematical Modelling. – 2016. – Vol. 40, iss. 2. – P. 1333–1343.
5. Nardini D., Brebbia C. A. A New Approach to Free Vibration Analysis using Boundary Elements, Boundary Element Methods in Engineering (Ed. C.A. Brebbia). – Berlin and New York : Springer-Verlag, 1982.
6. Fedotov V. P., Spevak L. F. One approach to the derivation of exact integration formulae in the boundary element method // Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2008. – Vol. 32 (10). – P. 883–888.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СТАЦИОНАРНОЙ И НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ СЛОИСТЫХ ДИССИПАТИВНЫХ НЕСЖИМАЕМЫХ СРЕД

Просвиряков Е.Ю., Спевак Л.Ф.

ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация,
e-mail: evgen_pros@mail.ru , lfs@imach.uran.ru

Возникновение слоистых течений в неоднородно нагретой вязкой несжимаемой жидкости довольно часто наблюдается в технологических процессах и природных явлениях. Наблюдаемые течения, например, в бесконечной полосе можно отнести к крупномасштабным из-за возникающей геометрической анизотропии. В этом случае можно пренебречь вертикальной скоростью и ее градиентами в уравнениях Обербека-Буссинеска. Формальное понижение размерности исследуемых краевых задач приводит к существенному усложнению их разрешимости, поскольку система уравнений становится переопределенной. Очевидно, что для нахождения численного решения переопределенной краевой задачи необходимо провести исследования разрешимости задачи. Было показано, что устранения переопределенности можно добиться посредством введения класса точных решений [1, 2], в котором скорости зависят от вертикальной компоненты и времени, а температура является линейной формой по горизонтальным координатам с коэффициентами, аналогичными скоростям. Данный класс точных решений обобщает течение Бириха [3]. Использование данного класса решений позволяет учесть конвективное и диффузионные слагаемые в калорическом уравнении, линеаризовать уравнения сохранения импульса и тождественно удовлетворить уравнению несжимаемости.

В данной работе рассмотрены начально-краевые задачи, возникающие при математическом моделировании слоистой конвекции в случаях нагрева одной из границ или задания распределений температуры на обеих границах. Исследование стационарных и неустановившихся решений задачи термокапиллярной конвекции показало, что рассматриваемые течения являются существенно двумерными. Приведено условие вырождения движения жидкости в одномерный поток. Учет конвективной производной в уравнении теплопроводности приводит при определенном отношении геометрических масштабов к образованию противотечений в жидкости. Этого эффекта не наблюдалось в классической работе Бириха [3]. Отметим, что рассматриваемые нестационарные решения с течением времени стремятся к стационарным режимам.

Литература

1. Сидоров А. Ф. О двух классах решений уравнений механики жидкости и газа и их связи с теорией бегущих волн // Прикл. механика и тех. физика. –1989. – № 2. – С. 34–40.
2. Аристов С. Н., Шварц К. Г. Вихревые течения адвективной природы во вращающемся слое жидкости. – Пермь : Изд-во ПГУ, 2006. – 154 с.
3. Бирих Р. В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости. // Прикл. мех. техн. физ. –1966. – №3. – С. 69–72.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФРАГМЕНТОВ ГУБЧАТОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ

Ластовкина Е.Н.[1], Колмакова Т.В.[1,2]

[1]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, д. 36, ул. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация*

[2]*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

e-mail: caterinka4@gmail.com, kolmakova@ftf.tsu.ru

Одной из основных проблем, возникающих при внедрении остеоимплантата в кость, является ее приграничная резорбция. Такая перестройка кости является следствием отклонения ее напряженно-деформированного состояния от оптимального при внедрении имплантата с отличными от кости механическими характеристиками.

Задачи механики, возникающие при создании остеоимплантатов, решаются на основе исследования механического поведения самих костных тканей и включают в себя создание подходов и способов моделирования их сложной иерархической структуры, определение их эффективных механических характеристик, установление основных требований к заменителям с точки зрения механики материалов имплантатов.

Кость является интеллектуальным биологическим композиционным материалом, подстраивающим свою структуру и свойства под изменяющиеся механические условия. В зависимости от анатомического расположения каждый фрагмент кости обладает определенной анизотропной структурой и свойствами. Губчатая костная ткань состоит из перекладин – трабекул. Трабекулы располагаются закономерно, соответствуя внешним нагрузкам, которые испытывает данная кость. Направленность расположения трабекул костной ткани определяется анатомическим расположением фрагмента кости.

Целями данной работы являлись разработка и создание модели фрагментов губчатой костной ткани с учетом их анатомических особенностей и расчет их напряженно-деформированного состояния (НДС) при одноосном сжатии.

Фрагмент губчатой костной ткани моделировался как совокупность трабекулярных узлов. Каждый трабекулярный узел включал в себя центр, представляющий собой сферу, и ½ часть главных и второстепенных трабекул, расположенных взаимоперпендикулярно.

Для построения фрагментов губчатой костной ткани использовались параметры эллипса структуры природной губчатой кости, представленные в работе [1]: длины главных и второстепенных трабекул и угол, определяющий направление расположения главных трабекул. Использовались представленные в работе [2] экспериментально полученные значения толщин трабекул.

Проведен расчет НДС модельных фрагментов губчатой костной ткани при осевом сжатии с использованием метода конечных элементов.

Анализ НДС модельных фрагментов губчатой костной ткани в дальнейшем позволит разработать рекомендации по созданию и подбору имплантатов, механически совместимых с костной тканью.

Литература

1. Functional adaption of cancellous bone in human proximal femur predicted by trabecular surface remodeling simulation toward uniform stress state / K. Tsubota [et al.] // Journal of biomechanics. – 2002. – № 35. – P. 1541–1551.

2. Dagan D., Be’ery M., Gefen A. Single-trabecula building block for large-scale finite element models of cancellous bone // Med. Biol. Eng. Comput. – 2004. – № 42. – P. 549–556.

ДЕНТИН – САМОПОДОБНАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Зайцев Д.В.[1], Ивашов А.С.[2], Мандра Ю.В.[2]

[1] *Уральский Федеральный Университет, Институт естественных наук, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620000, Российская Федерация, e-mail: dmitry.zaytsev@urfu.ru*

[2] *Уральский Государственный Медицинский Университет, д. 3, ул. Репина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация, e-mail: sashaivashov@gmail.com, jmandra@mail.ru*

Для расчета механических свойств твердых биологических тканей, нередко, их микроструктуру описывают самоподобной иерархической моделью, где твердые частицы помещены в мягкую матрицу в шахматном порядке, что формирует твердую частицу на следующем структурном уровне, а количество уровней определяется числом переходов. В действительности, микроструктура биологических тканей, включая дентин человека, устроена намного сложнее. Расчеты, проведенные при помощи иерархической самоподобной модели, зачастую противоречат результатам механических испытаний природных материалов, например, эмали человека и перламутра. Это может быть связано как с несоответствием предложенной модели, так и с существующими противоречиями в пониманиях прочностных свойств этих материалов, что обусловлено сложностями при проведении механических испытаний биологических тканей. Микроструктура наполненных полимеров используемых при реставрации твердых тканей зубов человека похожа на структуру самоподобной иерархической модели, где в полимерную матрицу помещается твердый наполнитель, а иерархия достигается за счет размеров наполнителя и образующихся из них кластеров. Матрица данных материалов, как правило, состоит из смеси полимеров на основе метакрилатов, а в качестве наполнителя используются кремний, цирконий и стекла. По количеству наполнителя эти материалы разделяют на высоко (>50 %) и мало (<50 %) наполненные. Сравнение деформационного поведения наполненных полимеров при сжатии и изгибе с дентином человека позволит оценить возможность применения самоподобной иерархической модели для описания механических свойств биоминералов на примере дентина.

Было показано, что объем загрузки наполнителя ~ 60 % полимерной матрицы является оптимальным для достижения модуль Юнга, который похож на дентин человека. Тем не менее, невозможно достичь необходимой пластичности при сжатии (~ 5 %) путем изменения размера частиц наполнителя при таком объеме наполнителя. Таким образом, невозможно создать композит на полимерной основе с механическими свойствами схожими со свойствами человеческого дентина с помощью варьирования количества и размера наполнителя. Полученные результаты, позволяют заключить, что самоподобная иерархическая модель может быть использована для расчета механических свойств человеческого дентина только в упругом режиме. При этом, микроструктуру человеческого дентина можно рассматривать как мягкую матрицы заполненную твердыми частицами, имеющими одинаковый размер. Действительно, было показано, что межтрубочковый дентин, определяет деформационное поведение дентина человека, в то время как дентинные каналы влияют только на процесс разрушения. Таким образом, достаточно одного уровня для расчета механических свойств дентина.

Работа выполнена при поддержке РНФ №15-19-10007

STRAIN-INDUCED SURFACE ROUGHENING IN POLYCRYSTALLINE ALUMINUM ALLOYS. EXPERIMENT AND SIMULATION

Romanova V.A.[1], Balokhonov R.R.[1,2], Kazachenok M.S.[1], Batukhtina E.E.[1]

[1]*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4 pr. Academicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation, e-mail: varvara@ispms.tsc.ru*

[2]*National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue 30, Tomsk, 634050, Russian Federation*

Surface roughness developing in aluminum alloys under loading is an unwanted effect responsible for the cosmetic defects and impairment of mechanical properties. Experimental and numerical investigations of surface roughening mechanisms are necessary to develop efficient methods of roughness suppression within certain scales.

Our study is addressed to the micro- and mesoscale effects where the grain structure plays a key role. Surface roughening in aluminum alloys as received and subjected to rolling was investigated experimentally and numerically in uniaxial tension. Experimental surface images and surface profiles were obtained at different stages of tensile loading. Roughness curves were plotted for the specimens loaded across and along the rolling direction.

Three-dimensional microstructural constitutive models with equiaxial and extended grains inherent in rolling have been developed and implemented in finite-element and finite-difference calculations. Phenomenological and crystal plasticity constitutive models were employed to describe the grain response. The effects of the microstructure, texture and loading conditions on the roughness patterns have been investigated.

This work is supported by a grant of the Russian Foundation for Basic Research (14-08-00277-A).

CRYSTAL PLASTICITY SIMULATIONS FOR THE DEFORMATION BEHAVIOR OF POLYCRYSTALLINE TITANIUM

Romanova V.A.[1], Balokhonov R.R.[1,2], Panin A.V.[1],
Shakhijanov V.S.[3], Shakhijanova N.O.[3], Batukhtina E.E.[1]

[1]*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation,*
[2]*National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation*
[3]*National Research Tomsk State University, Lenin Avenue, 36, Tomsk, 634050, Russian Federation,*
e-mail: arm3n1an@mail.ru

Numerical methods explicitly accounting for the material microstructure shows good promise for predicting the material behavior on different length scales. In this case, the material model employs the explicit dependence of the material properties on the spatial coordinates. An important problem of computational mechanics is to develop constitutive models which describe the microstructure mechanical response to loading as realistic as possible. Nowadays, crystal plasticity models are widely used for describing the elastoplastic behavior of polycrystalline metals. A polycrystal is treated as a conglomerate of single crystals, with the crystallographic orientations of grains and dislocation mechanisms of plastic deformation being taken into account in an explicit way.

In this paper, a constitutive model for polycrystalline titanium is constructed basing on the crystal plasticity theory. Three-dimensional polycrystalline models were generated by a step-by-step packing method. The grain orientations were given by the introduction of local coordinate systems associated with the grain crystallographic axes. Constitutive models of grains were constructed with account for the elastic and plastic anisotropy. Generalized Hooke's law was used to describe the elastic behavior. The plastic strains were calculated in terms of crystal plasticity as a summary slip over all active slip systems. A slip system is assumed to become active provided that the resolved shear stress here riches a critical value. Prismatic, basal and pyramidal slip systems were accounted for.

The titanium microvolumes were subjected to uniaxial tension, with the boundary-value problem being solved by the finite element and finite difference methods. Stress and strain evolution in the microvolumes was numerically investigated. The grain orientation effect on the plastic strain localization was examined.

The work is supported by the grant of Russian Science Foundation (№13-01-00114-a).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ КАБИНЫ ЛОКОМОТИВА ПРИ НЕРЕГЛАМЕНТИРОВАННЫХ НАГРУЗКАХ

Емельянов И.Г., Миронов В.И., Кузнецов А.В.

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

При проектировании кабин локомотивов конструкцию рассчитывают на эксплуатационные (регламентированные) нагрузки, которые приведены в «Нормах». Однако, при эксплуатации локомотивов могут встретится нерегламентированные нагрузки. Одна из таких нагрузок появляется при случайном наезде локомотива на препятствие (машину, трактор,). Необходимо выбрать рациональные геометрические параметры и материалы для элементов конструкции кабины локомотива, которые позволят минимизировать ущерб от различных аварийных ситуаций. Т.е. обеспечить защиту персонала и материальной части кабины, при нерегламентированной нагрузке, которая появляется при ударе кабины локомотива о препятствие.

В данной работе рассматривается подход определения границы области сопротивления для кабины локомотива при возможных нерегламентированных нагрузках. Данная предельная поверхность для входных эксплуатационных параметров движения локомотива определяет область безопасной эксплуатации конструкции кабины. Если параметры движения локомотива и препятствия будут ниже данной предельной поверхности, то обеспечивается защита персонала и материальной части кабины.

В качестве вычислительного комплекса, позволяющего решить задачу определения напряженного состояния кабины, использован комплекс ANSYS-14, основанный на методе конечных элементов. В работе реализован алгоритм расчета предельного состояния кабины с разрушающимися элементами. Для этого использован статический подход, который включён в общий алгоритм как последовательность краевых задач, разграниченных условиями разрушения отдельных элементов конструкции.

Сложность оценки силы взаимодействия локомотива с препятствием заключается в неопределенности всех параметров. Для определения силы взаимодействия необходимо, кроме скорости движения состава v, иметь информацию о массе m_2 и жесткости препятствия, коэффициенте сцепления, ориентации препятствия. Площадь и место приложения нагрузки необходимо также учитывать при определении границы области безопасной эксплуатации Γ_q.

Решая последовательно несколько краевых задач можно определить верхнюю границу Γ_q n-мерного множества Q, ниже которой рассматриваемый объект будет в безопасной области

$$\Gamma_q = \sup Q .$$

Для визуализации опасных сценариев столкновений с препятствиями в работе определена граница Γ_q (поверхность) в трехмерном пространстве $Q = \{v, m_2, S_f\}$. При этом, другие параметры пространства зафиксированы при наиболее вероятных значениях столкновения. По вертикальной шкале отчитывается скорость столкновения v в км/час, а по горизонтальной шкале масса препятствия m_2 в кг, по боковой оси f –коэффициент перекрытия площади лобовой балки, на которую приходится удар.

Таким образом, в отсутствие строгих решений статистической динамики в расчетной практике можно использовать детерминированные инженерные оценки предельного состояния сложных конструкций. На примере кабины газотурбовоза показано, каким образом можно обосновать требование повышения ее прочности, и тем самым обеспечить безопасность работы машинистов.

MESOMECHANICAL RESPONSE OF THE MATERIAL MICROSTRUCTURE FOMED ON THE ADVANCING SIDE OF THE FRICTION STIR WELDED ALUMINUM

Balokhonov R.R.[1,2], Romanova V.A.[1], Batukhtina E.E.[1], Shakhijanov V.S.[3], Martynov S.A.[1], Zinoviev A.V.[1], Zinovieva O.S.[1]

[1]*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russian Federation, e-mail: rusy@ispms.tsc.ru*

[2]*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation*

[3] *National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation*

The influence of the material microstructure observed in different zones of the friction stir welded duralumin on the mechanical properties of the alloy is investigated. Dynamic boundary-value problem in the plane strain formulation is solved numerically using explicit conditionally stable finite-difference approximation of the second order of accuracy [1, 2]. The constitutive material model takes into consideration an elastic-plastic formulation with isotropic strain hardening and a fracture criterion accounting for crack nucleation and growth in the local regions of maximum equivalent plastic strains. An algorithm was developed to design oriented and disoriented microstructures (Fig. 1a) observed experimentally in the nugget and in the thermo-mechanically affected zone (TMAZ) on the advancing side of the weld (Fig. 1b) and characterized by different shape and arrangement of polycrystalline grains [3].

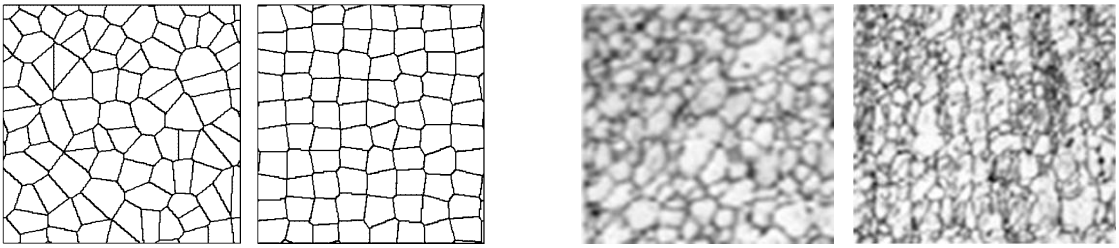


Fig. 1. Model a) and experimental b) microstructures observed in the nugget and TMAZ.

Deformation and fracture of the microstructures were analyzed under tension. Quantitative character of the stress patterns were shown to be different at the elastic and plastic deformation stages so that there is a redistribution of the stress concentration regions during the stage-to-stage transition. The maximum equivalent stress is observed in the regions of triple grain junctions. It is in these locations, where the cracks originate.

The disordered lamella microstructure of the material in the thermo-mechanically affected zone on the advancing side is found out to provide more uniform stress and strain distributions under loading and, accordingly, possesses higher strength than the polycrystalline microstructure in the base material and in the nugget, all other condition being equal.

This work is supported by Russian Foundation for Basic Research (grant № 16-01-00469-a).

References

1. R.R. Balokhonov, V.A. Romanova, S. Schmauder, S.A. Martynov, Zh.G. Kovalevskaya, A mesomechanical analysis of plastic strain and fracture localization in a material with a bilayer coating, Composites: Part B. 66 (2014) 276–286.

2. Balokhonov R.R. , Romanova V.A. , Batukhtina E.E. , Martynov S.A. , Zinovjev A.V., Zinovjeva O.S. A mesomechanical analysis of the stress-strain localisation in friction stir welds of polycrystalline aluminum alloys. Meccanica 51 2 (2016) 319-328.

3. Dumont M, Steuwer A, Deschamps A, Peel M, Withers PJ Microstructure mapping in friction stir welds of 7449 aluminium alloy using SAXS. Acta Materialia 54 (2006) 4793–4801.

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОФАЗНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПРОСТОМ НАГРУЖЕНИИ

Смирнов С.В., Коновалов А.В., Мясникова М.В., Халевицкий Ю.В., Смирнов А.С.

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

Многоуровневое описание структурно-неоднородного материала позволяет моделировать его механическое поведение на разных масштабных уровнях в том числе при развитой пластической деформации. Это дает возможность уже на начальных стадиях деформирования выявить эффект концентрации напряжений и установить закономерность развития разрушения в зависимости от истории изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) материала. Особенно актуальны такие исследования для гетерофазных след со сложной внутренней структурой, оказывающей определяющее влияние на неоднородность деформационных и прочностных характеристик материала. В настоящей работе численно исследован общий характер эволюции НДС структурно-неоднородного материала на макро- и микромасштабных уровнях для одноосного растяжения и сжатия с учетом реальных особенностей внутреннего строения и реологических свойств компонентов материала.

В качестве модельного материала использовали металломатричный композит (ММК), матрицей которого является алюминиевый сплав А8, а наполнителем – частицы SiC размером 15-20 мкм в форме неправильных призм. Между матрицей и частицами наполнителя имеет место прочное адгезионное взаимодействие. Геометрической моделью объема ММК на микроуровне является кусочно-однородный 3D объем, имитирующий матрицу, в которой располагаются частицы SiC. Для учета влияния окружающих слоев материала вокруг микрообъема ММК размещали буферный слой с усредненными свойствами композита. Составленная таким образом вычислительная модель на макроуровне представляет собой однородный представительный объем ММК в центре которого находится структурно-неоднородная частица материала ММК. Температурно-скоростное влияние на реологию сплава А8 и материала ММК учитывали посредством задания соответствующих кривых деформационного упрочнения. Матрицу задавали как изотропную упругопластическую среду с деформационным упрочнением, особенности которого были установлены экспериментально при осадке образцов со скоростью деформации 1 $с^{-1}$ при температуре 300 ^{o}C. Свойства буферного слоя, определенные при осадке на макроуровне в аналогичных условиях, соответствовали изотропной упруго-вязко-пластической среде. Материал частиц SiC полагали изотропным и линейно-упругим. Численные расчеты выполняли в программном комплексе ANSYS. В результате получили сведения об изменении компонент тензоров напряжений и приращений деформаций в узлах конечно-элементной сетки представительного объема ММК.

Экспериментально установлено, что первые трещины при нагружении ММК образуются в матрице. Это связано с тем, что твердые частицы SiC, присутствующие в мягкой матрице, формируют в непосредственной близости от себя зоны концентрации напряжений. С другой стороны, поверхности частиц являются причиной возникновения участков локальной пластической деформации, поскольку создают условия, аналогичные выдавливанию тонкого пластичного слоя между двумя жесткими поверхностями. По расчетным данным в узлах конечно-элементной сетки, принадлежащих матрице, определяли показатель напряженного состояния и коэффициент Лоде-Надаи. Получили поля распределений этих параметров внутри микрообъема ММК в зависимости от степени деформации в каждом виде нагружения. Эти данные планируется использовать в дальнейшем для моделирования поврежденности ММК.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ № 14-19-01358 в части создания трехмерной вычислительной модели и ее численной реализации применительно к ММК.

COMPUTATION OF TEMPERATURE FIELD IN WELDING SIMULATION

Ogorodnikova O.M., Davydov Yu.S.

Ural Federal University, 19 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation,
e-mail: O.M.Ogorodnikova@bk.ru

Arc welding is one of the most important manufacturing operations for the joining of structural elements for a wide range of parts and alloys. In this technology the arc and tip of the wire are submerged beneath a layer of granular, fusible material formulated to produce a proper weld. Submerged Arc Welding (SAW) is a high-productivity automatic welding method in which the arc is struck beneath a covering layer of flux. This increases arc quality because any contaminants in the atmosphere are blocked by the flux. The slag that forms on the weld generally comes off by itself and, combined with the use of a continuous wire feed, the weld deposition rate is high. Working conditions are much improved over other arc welding processes since the flux hides the arc and no smoke is produced. This process is especially efficient for large products but it is only used in steel fabrication industry.

In this work, the finite-element (FE) software ANSYS [1] was used to simulate welding process. The process of Submerged Arc Welding (SAW) was simulated for a lap joint. Heat-resistant steel 0.15C-12Cr-1.0Ni-0.6V-0.2W-0.2Mo was the base material in this analysis. The core task of the simulation was to compute temperature distribution and to verify the FE results by comparison with prominent analytical solution [2]. Finally, the temperature histories at various locations from weld line were found in reasonable agreement.

References

1. Огородникова О.М. Конструкционный анализ в среде ANSYS / Екатеринбург: УрФУ. 2004. 68 с.
2. Огородникова О.М. О проблемах интеграции вычислительного материаловедения в цифровое машиностроение // Информационные технологии в проектировании и производстве. Т. 154, № 2. 2014. С. 30-34.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БИМЕТАЛЛА КОНСТРУКЦИОННАЯ УГЛЕРОДИСТАЯ СТАЛЬ – НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ

Шляхова Г.В.[1,2], Баранникова С.А.[1,3], Зуев Л.Б.[1,3]

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

[2] *Северский технологический институт – филиал НИЯУ МИФИ, д. 65, пр. Коммунистический, г. Северск, Томская область, 636036, Российская Федерация,, e-mail: shgv@ispms.tsc.ru*

[3] *Национальный исследовательский Томский государственный университет, д. 36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,, e-mail: lbz@ispms.tsc.ru*

В настоящее время биметаллы, у которых основной несущий слой выполнен из недорогой конструкционной малоуглеродистой стали, а наружный слой, взаимодействующий с рабочей средой – из легированной нержавеющей стали, находят все более широкое применения в различных областях техники. Однако, если такой биметалл работает при повышенных температурах, то вследствие разных химических потенциалов компонентов наблюдается их диффузия с образованием новых фаз. В связи с этим, протекающие в зоне соединения при нагреве процессы могут оказывать влияние на структуру и свойства биметалла.

Настоящая работа посвящена изучению структуры биметалла в зоне соединения конструкционной и нержавеющей сталей. В качестве материала исследований использовали образцы, вырезанные из листа Ст.3+Х18Н8, полученного методом заливки с последующей прокаткой на необходимую толщину.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе отраженного света NEOPHOT-21, оборудованном цифровой камерой Genius VileaCam, при увеличении 10 - 2000 крат в поперечном сечении. Измерения микротвердости проводили методом восстановленного отпечатка в соответствии с ГОСТ 9456-76 на микротвердомере ПМТ-м при нагрузке 1 Н. Исследование фазового состава и параметров структуры тонкой структуры биметалла проводили на атомно-силовом микроскопе Solver PRO-47H в контактном режиме.

Микротвердость биметалла в зоне сопряжения (соединения) оказалась выше микротвердости основного металла и плакирующих слоев вне этой зоны. Изучение микроструктуры показало, что в зоне сопряжения в аустенитной нержавеющей стали Х18Н8, образуется науглероженная зона, а в малоуглеродистой конструкционной стали Ст.3 – сильно обезуглероженная зона со структурой феррита.

Образующиеся в зоне сопряжения слои: обезуглероженный, науглероженный, карбидный оказывают существенное влияние на свойства биметалла. В связи с этим далее проводили детальное изучение микроструктуры зоны соединения с использованием атомно-силовой микроскопии. Для более точного выявления рельефа элементов структуры биметаллического композита, применяли контактный метод в режиме “постоянной силы“. Использование данного режима заключается в том, что сигнал системы обратной связи, возникающий в процессе сканирования, устанавливается таким образом, что система способна отрабатывать относительно гладкие особенности рельефа достаточно быстро, и в то же время, быть достаточно медленной, чтобы отрабатывать крутые ступеньки поверхности. Такой способ отображения применяется для поиска небольших элементов структуры на большом участке относительно гладкой поверхности материала.

Таким образом, анализ микротвердости выявили, что в зоне сопряжения сталей Ст.3 и Х18Н8 происходит значительное упрочнение материалов. Результаты исследований оптической и атомно-силовой микроскопии позволили выявить, что в основном металле Ст.3 образуется обезуглероженный слой, а в стали Х18Н9 – науглероженный слой. Кроме того, на границе биметалла обнаружен промежуточный слой (карбидный), глубиной до 25 мкм.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ НАНОКРИСТАЛЛА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Мержиевский Л.А.[1], Головнев И.Ф.[2], Головнева Е.И. [2]

[1] *Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, д. 15, пр. Лаврентьева, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация, e-mail:* merzh@hydro.nsc.ru

[2] *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, д. 4/1, ул. Институтская, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация*

Методы молекулярной динамики заняли важное место в исследовании микроструктурных механизмов деформирования и разрушения кристаллических материалов. Особое внимание уделяется нанокристаллическим материалам. Известно, что обычные микроструктурные и наноструктурные среды резко отличаются по своим механическим, физико-химическим и термодинамическим свойствам. Как показывают расчеты, это обусловлено различием в соотношении количества поверхностных и объемных атомов.

В данной работе излагаются результаты молекулярно-динамического моделирования и исследования особенностей процесса одноосного ударного (кратковременного) сжатия нанокристаллов меди. Для описания межатомного взаимодействия использован модифицированный вариант широко используемого многочастичного потенциала Воутера (*Voter A.F.*). Расчеты проводились с использованием скоростной модификации Верле второго порядка точности с шагом по времени 10^{-16} с. Анализ результатов расчетов проводился разработанным авторами методом мезоанализа системы.

В результате расчетов детально проанализированы изменения плотности, скорости центров масс, температуры и потенциальной энергии мезообъемов в разные моменты времени. Установлены интервалы амплитуд ударных волн, на которых реализуются разные механизмы диссипации энергии. Показано, что существует предельная внешняя нагрузка, при достижении которой в нанокристалле с идеальной кристаллической решеткой происходит скачкообразное изменение механизма поглощения энергии. В расчете наблюдается образование множества дефектов структуры, в том числе и аналогичных дислокациям.

Полученные данные показывают, что в пластической волне происходит аморфизация структуры. Процесс сопровождается появлением ротационной составляющей деформации. Расчеты позволили определить критические величины амплитуд нагружающего импульса, при которых происходит потеря устойчивости кристаллической решетки.

Далее было исследовано влияние размеров наноструктур (нанокристаллов) на особенности процесса одноосного сжатия. В этих расчетах варьировались поперечные размеры кристалла, которые обусловливали соотношение количества поверхностных и объемных атомов. Были выбраны следующие размеры поперечного сечения (число кристаллических ячеек в направлении осей YZ): 5x5, 7x7, 10x10. В направлении сжатия вдоль оси X число кристаллических ячеек было фиксированным и равным 50 или 200.

Установлено, что с увеличением поперечного размера изменяется характер деформирования (движения мезообъемов) в области ударного сжатия. Происходит уменьшение ротационных составляющих (интенсивности вихрей, моментов импульса в выделяемых при анализе ячейках) и относительного вклада ротационной энергии во внутреннюю энергию нанокристалла. С ростом поперечного размера температурный скачок на фронте ротационной волны уменьшается и сглаживается. Таким образом, полученные результаты показывают, что структура ударной волны существенно зависит от размеров нанокристалла.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00468).

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ 04Х20Н6Г11М2АФБ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

Саврай Р.А.[1], Макаров А.В.[1,2], Горкунов Э.С.[1], Печеркина Н.Л.[2],
Роговая С.А.[1], Осинцева А.Л.[1], Калинин Г.Ю.[3], Мушникова С.Ю.[3]

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: ras@imach.uran.ru*

[2]*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация*

[3]*ФГУП «ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ», д. 49, ул. Шпалерная, г. Санкт-Петербург, 191015, Российская Федерация*

Азотсодержащие аустенитные стали различных систем легирования обладают высокими показателями прочности, пластичности, коррозионной стойкости, трибологических и магнитных характеристик. ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН с участием ИФМ УрО РАН разработаны составы и режимы термических и термомеханических обработок аустенитных Cr-Ni-Mn-Mo-N сталей с 0,3–0,5 мас. % азота. Данные стали перспективны для использования в качестве корпусных материалов в судостроении, в частности для создания плакирующего слоя двухслойных сталей для корпусов ледоколов большой мощности. При эксплуатации в условиях низких температур металлических изделий и конструкций существенно возрастает опасность их хрупкого разрушению при различных видах объемного и контактного нагружения. Однако до настоящего времени комплексному изучению механических характеристик (в том числе пластичности, вязкости, трещиностойкости) азотистых сталей при пониженных и повышенных температурах испытаний не уделялось столь пристального внимания, как при изучении механических свойств при комнатной температуре. В настоящей работе проведен комплекс исследований по определению механических свойств и изучению фрактографических особенностей разрушения и эволюции структуры при испытаниях на растяжение при температурах испытаний −70…+140 °С коррозионностойкой азотсодержащей стали 04Х20Н6Г11М2АФБ (0,47 мас. % N) с аустенитной структурой. Установлено, что с уменьшением температуры испытания от +140 до −70 ºС у стали 04Х20Н6Г11М2АФБ наблюдается линейное увеличение характеристик прочности (условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ от 450 до 800 МПа, временного сопротивления разрыву $\sigma_в$ от 810 до 1250 МПа и напряжения разрушения $\sigma_к$ от 530 до 990 МПа), которое можно разделить на два температурных интервала, характеризующихся разной интенсивностью упрочнения. Границы указанных температурных интервалов находятся в пределах от +140 до +50ºС и от +50 до −70ºС: при понижении температуры испытаний на растяжение в интервале от +50 до −70°С наблюдается более интенсивный рост прочностных характеристик стали 04Х20Н6Г11М2АФБ по сравнению с упрочнением при снижении температуры испытания в диапазоне температур от +140 до +50 °С. При этом в данных температурных интервалах характеристики пластичности равномерное $\delta_р$, общее δ_5 и сосредоточенное $\delta_{соср}$ удлинения имеют различные значения, в среднем постоянные для данного интервала ($\delta_р$=27,1 %, δ_5=38,3 %, $\delta_{соср}$=11,2 % в температурном интервале от +140 до +50 ºС и $\delta_р$=30,3 %, δ_5=44,5 %, $\delta_{соср}$=14,2 % в температурном интервале от +50 до −70 ºС). Таким образом, обнаружен новый эффект более интенсивного роста прочностных характеристик стали 04Х20Н6Г11М2АФБ в условиях испытаний на растяжение при понижении температуры испытаний в интервале от +50 до −70°С по сравнению с упрочнением при снижении температуры испытаний в диапазоне более высоких температур при одновременном увеличении характеристик пластичности в интервале более низких температур испытаний. Указанный эффект может быть обусловлен более интенсивным двойникованием аустенита в условиях испытаний на растяжение при пониженных температурах, а также другими факторами, требующими дополнительных исследований. Фрактографическими исследованиями для азотистой аустенитной стали 04Х20Н6Г11М2АФБ установлено сохранение преимущественно вязкого характера разрушения при понижении температуры испытаний на растяжение вплоть до −70 °С.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 01201354598 и ФАНО России по теме «Структура» № 01201463331 (проект № 15-15-2-16).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

Саврай Р.А.[1], Макаров А.В.[1,2], Соболева Н.Н.[1], Малыгина И.Ю.[1], Осинцева А.Л.[1]

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: ras@imach.uran.ru*

[2]*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация*

Способность выдерживать контактные нагрузки является важной характеристикой машиностроительных материалов и покрытий. Оценка циклической прочности материалов в условиях контактного воздействия, как правило, производится с помощью разнообразных контактно-усталостных испытаний. В настоящей работе предложен новый подход для оценки способности материалов выдерживать повторяющиеся контактные нагрузки в условиях контактно-усталостного нагружения с использованием метода микроиндентирования (однократное нагружение). Данный подход заключается в определении на основе данных микроиндентирования параметров H_{IT}/E^* (отношение твердости вдавливания к контактному модулю упругости), $\%R=((h_{max}-h_p)/h_{max})\times100\%$ (упругое восстановление; h_{max} и h_p – соответственно максимальная и остаточная глубина вдавливания индентора) и степенное отношение H_{IT}^3/E^{*2}. Параметры H_{IT}/E^* и %R характеризуют упругую деформацию (долю упругой деформации в общей деформации) и, соответственно, способность материала сопротивляться контактному воздействию без пластического деформирования. Отношение H_{IT}^3/E^{*2} пропорционально напряжению течения материала, поэтому его принято считать характеристикой сопротивления материала пластической деформации. Чем выше значения указанных параметров, тем выше способность материала выдерживать более высокие контактные нагрузки до начала пластического деформирования и сопротивляться разрушению не только при статических, но и при циклических контактных нагрузках.

Предложенный подход был опробован на хромоникелевых покрытиях, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки, из порошков ПГ-СР2 (в мас. %: 0,48 C, 14,8 Cr, 2,1 B) и ПГ-10Н-01 (в мас. %: 0,92 C, 18,2 Cr, 3,3 B) при контактном нагружении методом микроиндентирования с использованием индентора Виккерса и при неударном циклическом нагружении по схеме контакта «шар-плоскость». Результаты микроиндентирования показали, что отношение H_{IT}/E^* возрастает от 0,032 у покрытия ПГ-СР2 до 0,050 у покрытия ПГ-10Н-01; упругое восстановление %R возрастает от 23,6 % до 32,7 %; степенное отношение H_{IT}^3/E^{*2} возрастает от 0,007 до 0,025. Таким образом, из данных микроиндентирования следует, что при увеличении концентрации в составе покрытий углерода и элементов замещения и, соответственно, количества и твердости упрочняющих фаз, повышается способность поверхности хромоникелевых лазерных наплавок выдерживать более высокие контактные нагрузки до начала пластического деформирования. Контактно-усталостные испытания показали, что исследованные покрытия в различной степени подвержены разрушению в условиях повторяющегося упругопластического деформирования. При испытаниях на базе 10^6 циклов с ростом числа циклов нагружения у менее легированного покрытия ПГ-СР2 наблюдается существенное увеличение размера контактных повреждений, тогда как у покрытия ПГ-10Н-01 происходит лишь незначительный рост диаметра пятна контакта. Основными механизмами формирования пятна контакта при этом являются пластическое деформирование и трещинообразование. То есть, для более легированного и твердого покрытия при циклическом нагружении установлено ограничение процессов пластического деформирования и трещинообразования, которое обусловлено его повышенной способностью деформироваться преимущественно в упругой области в данных условиях нагружения, что подтверждается полученными результатами микроиндентирования. Следовательно, метод микроиндентирования (однократное нагружение) может быть использован для оценки способности хромоникелевых покрытий выдерживать повторяющиеся контактные нагрузки.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 01201375904 при частичной поддержке гранта РФФИ 15-08-06754_а.

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЛАЗЕРНОГО NiCrBSi ПОКРЫТИЯ, УПРОЧНЕННОГО ФИНИШНОЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Соболева Н.Н.[1], Макаров А.В.[1,2], Малыгина И.Ю.[1], Саврай Р.А.[1]

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: natashasoboleva@list.ru*

[2]*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990 Российская Федерация*

NiCrBSi покрытия, нанесенные на поверхность детали газопорошковой лазерной наплавкой, находят применение для восстановления изношенных поверхностей и при изготовлении новых изделий, работающих в условиях трения скольжения и абразивного изнашивания (валы, плунжеры, насосные вкладыши, штампы и др.).

Однако технологические особенности газопорошковой лазерной наплавки не позволяют применять такие покрытия без дополнительных финишных операций в прецизионных узлах трения, где очень важно получить деталь с фиксированными размерами и качественной поверхностью. В настоящее время в качестве финишной обработки применяется шлифование, имеющее ряд недостатков, поскольку шлифование может сопровождаться появлением «прижогов» (участков с пониженной твердостью) и микротрещин, а также опасных растягивающие напряжений, приводящих к трещинообразованию в поверхностном слое, особенно в условиях циклических нагрузок. Применение технологии поверхностного пластического деформирования, в частности фрикционной обработки скользящими инденторами, в качестве финишной обработки покрытий позволяет устранить многие недостатки шлифования, обеспечив одновременно дополнительное повышение прочностных и трибологических свойств, формирование благоприятных сжимающих напряжений, а также низкую шероховатость поверхности.

Цель работы – изучить возможность использования поверхностного пластического деформирования скользящим индентором в качестве финишной фрикционной обработки NiCrBSi покрытия, полученного лазерной наплавкой, и исследовать влияние указанной обработки на характеристики износостойкости и механизмы изнашивания в условиях трения скольжения.

Фрикционная обработка NiCrBSi покрытия 0,48 % C; 14,8 % Cr; 2,6 % Fe; 2,9 % Si; 2,1 % B; остальное – Ni) проводилась полусферическим индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора при нагрузке 350 Н на воздухе при пятикратном сканировании индентором плоских наплавленных поверхностей.

Такая финишная обработка NiCrBSi покрытия, сформированного лазерной наплавкой, обеспечивает высокое качество поверхности (Ra=60 нм) и достижение повышенной микротвердости 855 HV0,025 на поверхности покрытия (по сравнению с твердостью покрытия без фрикционной обработки – 570 HV0,025). Общая глубина упрочненного слоя достигает 100 мкм. В тонком поверхностном слое (5–7 мкм) при фрикционной обработке формируется смешанная нано- и субмикрокристаллической структура γ-твердого раствора на основе Ni, обогащенного бором, хромом и углеродом вследствие деформационного растворения боридов никеля и карбидов хрома, а также содержащая диспергированные и не полностью растворившиеся частицы карбида $Cr_{23}C_6$. В условиях сухого трения скольжения фрикционная обработка покрытий устраняет период приработки и обуславливает смену основных механизмов изнашивания покрытия от схватывания и пластического оттеснения к упругому оттеснению. Это приводит к росту износостойкости покрытия на начальном этапе трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РРФИ, проект № 16-38-00452, а также в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 01201375904 и комплексной программы УрО РАН, проект №15-9-12-45.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ SIO_2 И УГЛЕРОДА В АМОРФНО-ПОДОБНОМ СОСТОЯНИИ

Дмитриев А.И., Никонов А.Ю.

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

Томский государственный университет, д. 36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация

e-mail: dmitr@ispms.ru

В работе с использованием метода молекулярной динамики проведено изучение особенностей механизмов относительного проскальзывания, протекающих в области контакта двух кристаллических тел, содержащих аморфную прослойку. В качестве объектов исследования были выбраны образцы, состоящие из атомов Si и O, образующих решетку кремнезема, и образцы, содержание прослойку из атомов углерода. Выбор материалов обусловлен имеющимися литературными данными, указывающими на то, что кремнезем и углерод в аморфно подобном состоянии характеризуются низкими фрикционными свойствами.

В работе изучались особенности поведения выбранных материалов в условиях сдвигового нагружения. С этой целью моделировались следующие конфигурации: два кристаллита ОЦК железа с аморфным промежуточным слоем углерода, два алмазных кристалла с аморфным слоем углерода и два кристалла кремнезема с промежуточным слоем того же материала в аморфно-подобном состоянии. Межатомное взаимодействие в случае железа и алмаза с углеродом описывалось в рамках модифицированного метода погруженного атома [1]. Для изучения поведения образца из кремнезёма использовался трёхчастичный потенциал межатомного взаимодействия, предложенный Терсоффом [2]. Моделировалось сдвиговое нагружение с постоянной скоростью. Одновременно с этим прикладывалась дополнительная сжимающая сила, величина которой варьировалась в различных задачах.

Результаты моделирования позволили выявить несколько механизмов относительного проскальзывания, реализующихся в объеме аморфной прослойки, которые способствуют проявлению низких фрикционных свойств исследуемых материалов. Один из обнаруженных механизмов заключается в формировании согласованного коллективного движения атомов ротационного характера. Обнаружено влияние температурного фактора на особенности механизмов относительного проскальзывания моделируемых материалов. Таким образом, показано, что оба исследуемых материала в аморфно-подобном состоянии могут проявлять низкие фрикционные свойства, а, следовательно, выступать в качестве частиц твёрдой смазки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №14-19-00718.

Литература

1. L.S.I. Liyanage, et al., Phys. Rev. B 89, 094102 (2014).
2. S. Mumetoh et al, Comp. Mat. Sci. 39, 334-339 (2007).

ПРИМЕНЕНИЕ ГАУССОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НА ГРУППЕ SO(3) ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Берестова С.А., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А.

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, n_ misura @mail.ru, mityushov-e@mail.ru

Известно, что количественное описание кристаллографической текстуры может быть осуществлено различными способами: по методу удельных объемов, с помощью функции распределения ориентации (ФРО), с помощью модельных представлений. К модельным представлениям текстуры относятся, в частности, работы, в которых ФРО записывается в виде нормальных распределений на группе $SO(3)$ [1]. Значительной общности описания при моделировании кристаллографической текстуры можно добиться если использовать общее представление гауссова распределения на римановых многообразиях [2].

Следуя идеям работы [2], получена простая модельная ФРО, соответствующая гауссову распределению аксиальной кристаллографической текстуры в виде:

$$F(\vartheta) = \frac{e^{-\gamma \vartheta^2}}{\int_0^{\pi} \frac{\sin \vartheta}{2} e^{-\gamma \vartheta^2} d\vartheta}$$

Если $\gamma \to 0$, то $F(\vartheta) \to 1$ (реализуется равновероятное распределение кристаллографических осей), при $\gamma \to \infty$, $F(\vartheta) \to \delta(\theta)$ (реализуется идеальная аксиальная текстура).

Литература

1. Yu Qiu, Daniel J. Nordman, Stephen B. Vardeman. A wrapped trivariater normal distribution and bayes inference for 3-D rotation // Statistica Sinica, 24 (2014), p. 897–917.

2. Xavier PENNEC. Probabilities and Statistics on Riemannian Manifolds: Basic Tools for Geometric measurements // Presented at the Int. Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing (NSIP’99) Antalya, Turkey – June 20–23, 1999.

РОЛЬ МЕДЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН В ФОРМИРОВАНИИ ОЧАГОВ РАЗРУШЕНИЯ

Макаров П.В., Перышкин А.Ю.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: pvm@ispms.tsc.ru, alexb700@yandex.ru

Впервые медленные фронты неупругой деформации были изучены при нагружении металлических образцов и известны как фронты Людерса. Скорости их распространения обычно находятся в пределах 10–50 мкм/с.

Во второй половине XX века получила развитие и широко дискутируется концепция «медленных движений» – деформационных возмущений в геосредах, которые интерпретируются как волны деформаций, распространяющиеся от источников возмущений (обычно это границы блоков, разломы разных масштабов). Скорости таких деформационных возмущений составляют 1-100 км/год и занимают промежуточное значение между скоростями звука (ниже на 5-6 порядков) и скоростями тектонических течений (выше на 7-8 порядков). Впервые подобные медленные деформационные фронты были установлены по явлению направленной миграции очагов землетрясений. Есть серьёзные основания полагать, что медленные деформационные фронты вносят значительный вклад в формирование очагов разрушения.

В работе анализируются известные данные по изучению генерации медленных деформационных волн разных масштабов, начиная от фронтов Людерса в металлах до медленных деформационных волн в геосредах, распространяющихся на тысячи километров.

Медленные деформационные волны трактуются как автоволновые процессы, обусловленные локальной неустойчивостью нелинейной нагружаемой среды, её параметрическим возбуждением и кооперативным откликом на нагружение.

Развита математическая модель генерации и распространения деформационных автоволн в нагружаемой нелинейной среде. Разработанная модель представляет связанную динамическую задачу упруго-пластического деформирования прочной среды, которая дополняется определяющими уравнениями, задающими скорости генерации неупругих деформаций. В такой нелинейной среде развиваются как обычные волны напряжений, распространяющиеся со скоростью звука, так и медленные деформационные автоволновые процессы. Модель тестируется на моделировании фронтов Людерса в металлах.

Показано, что деформационные фронты активно участвуют в формировании очагов разрушения, стекаясь в формирующийся очаг и способствуя локализации в нем деформаций и повреждений.

Таким образом, как фронты Людерса в металлах, так и медленные деформационные волны в геосредах – так называемые «медленные движения», являются автоволновыми процессами, развивающиеся в нелинейной среде и представляют собой кооперативный отклик среды на нагружение, обладающей свойством самоорганизованной критичности, т.е. являются результатом самоорганизации в деформируемой среде.

Благодарности. *Данные исследования выполнены в рамках программы фундаментальных исследований государственной академии наук на 2013-2020 гг.*

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 50 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Саврай Р.А.[1], Макаров А.В.[1,2], Малыгина И.Ю.[1], Давыдова Н.А.[1]

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: ras@imach.uran.ru*

[2]*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация*

Одной из важнейших задач современного машиностроения является обеспечение необходимой работоспособности и долговечности изделий в заданных условиях эксплуатации. Для решения этой проблемы широко используются различные способы обработки поверхности, которая во многих случаях, например, при эксплуатации изделий в условиях циклического нагружения, играет определяющую роль в обеспечении их работоспособности. Однако, упрочнение поверхности в зависимости от способа воздействия на нее может сопровождаться нежелательными побочными явлениями (например, снижением пластичности и увеличением склонности к разрушению). Эффективным способом устранения недостатков, присущих тому или иному способу поверхностного упрочнения деталей, является использование комбинированных методов обработки, включающих в себя воздействие на обрабатываемую поверхность нескольких факторов. К таким обработкам можно отнести комбинированную деформационно-термическую обработку, сочетающую поверхностное упрочнение методом интенсивного пластического деформирования и последующее термическое воздействие, улучшающее пластические свойства предельно упрочненного материала.

В настоящей работе исследованы особенности деформирования и разрушения при статическом и циклическом растяжении закаленной стали 50 (0,51 % С), подвергнутой комбинированной деформационно-термической обработке по оптимальному режиму, включающему фрикционную обработку с последующим отпуском при температуре 350 °С. Установлено, что по сравнению с термической обработкой комбинированная деформационно-термическая обработка приводит к резкому повышению микротвердости поверхности закаленной стали 50 (от 460 до 1000 HV0,025) за счет сильного диспергирования мартенситной структуры вплоть до нанокристаллического состояния и протекания в кристаллах тетрагонального мартенсита деформационного динамического старения, приводящего к закреплению возникающих при фрикционной обработке многочисленных дислокаций сегрегациями из атомов углерода. Наблюдается также некоторое повышению прочностных характеристик (предела текучести $\sigma_{0,2}$ от 1420 до 1440 МПа, временного сопротивления разрыву σ_B от 1550 до 1570 МПа, напряжения разрушения σ_K от 1280 до 1390 МПа). При этом равномерное удлинение δ_P практически не изменяется (от 3,2 до 2,9 %), общее удлинение снижается от 10,7 до 6,9 %, оставаясь при этом достаточно высоким. Комбинированная деформационно-термическая обработка закаленной стали 50 оказывает существенное влияние на вид кривой нагружения при статическом растяжении, заключающееся в исчезновении площадки текучести образцов. В условиях циклического растяжения в результате комбинированной обработки происходит подавление образования деформационного рельефа, обусловленного действием в объеме материала сдвиговых и поворотных мод деформации. Таким образом, комбинированная наноструктурирующая обработка закаленной стали 50 изменяет характер развития пластического течения материала при нагружении, делая его более равномерным. При статическом растяжении это проявляется в исчезновении площадки текучести на начальном этапе деформирования, а при циклическом – в подавлении образования деформационного рельефа. При этом на протяжении всего процесса усталостного нагружения упрочненный поверхностный слой, несмотря на появление трещин, не разрушается полностью (не отслаивается) и сохраняет высокую способность сопротивляться контактному механическому воздействию, о чем свидетельствуют результаты микроиндентирования.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-10-1-22) и в рамках государственного задания ФАНО России по теме «Структура» № 01201463331.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОРГСТЕКЛЕ

Владимиров А.П. [1], Каманцев И.С. [1], Друкаренко Н.А. [1], Тришин В.Н. [1], Дружинин А.В.[2]

[1]*ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург*

[2]*ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, e-mail:* vap52@bk.ru

В настоящее время нахождение предвестников усталостного разрушения объектов в условиях многоциклового усталостного нагружения является актуальной, до конца не решенной задачей. Ранее был предложен метод динамической спекл-интерферометрии для контроля процесса зарождения усталостной трещины, позволяющий проводить исследования усталостных явлений без остановки циклических нагружений [1]. При испытании по схеме трехточечного изгиба металлических образцов с надрезом типа Шарпи с использованием метода спекл-интерферометрии, оптической профилометрии и сканирующей атомно – силовой микроскопии были изучены особенности развития рельефа боковой поверхности образца до старта трещины. Однако было не ясно, как идет процесс накопления повреждений по толщине образца. Таким образом, целью работы являлось изучение процесса накопления усталостных повреждений в объеме модельного образца с надрезом типа Шарпи, изготовленного из оптически прозрачного материала – оргстекла.

Физической величиной характеризующей изменения свойств выбранного материала в объеме образца может являться изменение показателя преломления среды вследствие локализации пластических деформаций в вершине концентратора и изменения плотности материала в некотором его объеме. Для визуализации изменения показателя преломления по глубине, образец зондировали спекловым пучком, направленным под углом 30° к поверхности. Анализ спекловых изображений показал, что первые признаки необратимых процессов возникают вблизи надреза в глубине образца. Было сделано предположение, что форму поврежденной области можно рассматривать как осе-симметричную, при этом центр симметрии, по результатам эксперимента, находился на некотором расстоянии от надреза. Было установлено, что зависимость коэффициента корреляции фрагмента спекловых изображений от координаты, полученная при сканировании этого фрагмента через центр поврежденной области, имела такие же особенности, как и для образцов из металла.

В результате обработки зависимостей $\eta(x)$, зарегистрированных на разных этапах циклического нагружения, с использованием известного метода Шардина [2] были получены зависимости показателя преломления среды и изменения плотности материала от расстояния до центра симметрии поврежденной области. Показано, что распределение плотности имеет вид «колокола».

Работа выполнена при частичной поддержке проектами УрО РАН № 15-15-1-52, № 15-10-1-22 и № 15-7-1-20.

Литература

1. А.П. Владимиров. Использование динамической спекл-интерферометрии для бесконтактной диагностики зарождения усталостной трещины и определения скорости ее роста. / И.С. Каманцев, В.Е. Веселова, Э.С. Горкунов, С.В. Гладковский// Журнал технической физики, 2016, том 86, вып.4. С. 85–90.
2. В.Хауф, У.Григуль. Оптические методы в теплопередаче. М: Мир, 1973. – 240 с.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ И РАЗРУШЕНИЯ ПРЕССОВОК ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А., Попов А.В.

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: zhilin@imim.ru

Преимуществом способа получения точного литья по пористым выплавляемым моделям является устранение усадочных явлений, поверхностных неровностей, повышение стойкости керамических оболочковых форм к образованию трещин в процессе выплавления моделей из них [1]. Пористые выплавляемые модели получают формованием различных фракций порошков модельных составов и характеризуются достаточной прочностью при испытании на разрушение. Прессовки отличаются от традиционных выплавляемых моделей физико-механическими свойствами, размерно-геометрической точностью [2, 3].

При прессовании модельного порошка за счет его трения о стенки пресс-формы происходит оплавление периферийных зон будущей модели и воздух, расположенный в центральных ее участках не имеет свободного выхода из последней. В процессе формирования прессовки заключенный в пресс-форме воздух с модельным материалом после разъема формы и, следовательно, снятия нагрузки упруго релаксирует. В связи с этим размеры модели увеличиваются в продольном прессованию направлении на 0,7–1,2 %, а в поперечном на 0,3–0,5 %. Кроме того, при одноосном прессовании наблюдается неравномерное распределение плотности материала в выплавляемой модели. Так, например, поверхностная твердость и плотность выплавляемой модели в зонах, соприкасающихся с пресс-пуансоном выше, чем в противоположных участках.

Целью работы является определение оптимального варианта формообразования пористой прессованной модели из полимерных дисперсных композиций, при которых достигается снижение влияния упругого последействия прессовок на их размерно-геометрическую точность с сохранением требуемых прочностных характеристик.

Экспериментально определены варианты формообразования моделей с учетом упругого последействия, возникающего в прессовке при различной скорости уплотнения. Так, значительное сокращение упругого отклика достигается предварительным уплотнением порошковой композиции встряхиванием в пресс-форме и созданием в ней разряжения во время уплотнения порошкового тела. В ходе эксперимента установлены предпочтительные режимы прессования полимерных дисперсных композиций, при которых достигается равномерная плотность в объеме прессовок, позволяющая сократить упругий отклик последних на 10–15 % с сохранением требуемой прочности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН (проект 15-I-4-018) "Расчетное и опытное совершенствование процессов профилирования и высокоточного литья на основе новых модельных представлений и специальной серии вычислительных экспериментов. (Раздел 4)."

Литература

1. Жилин С.Г., Комаров О.Н., Сапченко И.Г. Упругий отклик прессовок при деформировании гетерогенных порошковых материалов // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. №4(26), С.184–191

2. С.Г. Жилин, И.Г. Сапченко Влияние упругого отклика деформируемого порошкового полимерного материала на размерно-геометрические параметры прессовки // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов (Казань, 20–24 августа 2015 г.). Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015., С. 1383–1385

3. Жилин С.Г., Сапченко И.Г. Технологические особенности обратимых деформаций при разгружении прессованных дисперсных полимерных композиций // Материалы VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (Чебоксары, 16–21 июня 2014 г.): в 2 ч. Ч.1 / под ред. Н.Ф. Морозова, Б.Г. Миронова, А.В. Манжирова. – Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2014. С.156–158

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНОГО ШВА БИМЕТАЛЛА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Веретенникова И.А., Коновалов Д.А., Смирнов С.В.

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

Исходя из особенностей сварки взрывом, сварной шов в биметалле характеризуется геометрической неоднородностью волнового профиля на границе раздела и наличию упрочненной околошовной зоны. При дальнейшей эксплуатации и обработке биметаллов всегда необходимо учитывать эти особенности и прогнозировать поведение околошовной зоны. Целью данной работы была оценка изменений свойства сварной границы в биметалле при поэтапной пластической деформации в объеме материала. Поэтапную пластическую деформацию осуществляли прокаткой. В качестве основного способа оценки сварного шва выбрали метод индентирования, который дает оценку распределению механических свойств в объеме материала без изготовления большого количества образцов и проведения сложных испытаний. В работе исследовали биметаллическую полосу «08Х18Н10Т-сталь 10».

В результате исследования были сделаны следующие выводы.

— Сварной шов в биметалле вносит существенный вклад в поведение биметалла при деформации, в частности значительно влияет на его пластические характеристики. Механические свойства по части прочности остаются на уровне наиболее прочного материала, что нельзя сказать про пластические характеристики, они остаются на среднем уровне, однако существенно меньше пластичности наиболее пластичного материала и меньше пластичности составляющих материалов.

Деформация составляющих биметалла по ходу прокатки носит неравномерный характер. Первоначально большую деформацию испытывает наименее прочный материал из составляющих биметалл, при достижении данным слоем прочности второго составляющего, большую деформацию начинает претерпевать слой, обладающий меньшей склонностью к деформационному упрочнению. Данный вывод касается двухслойных биметаллов и может отличаться для материалов с большим количеством слоев.

С увеличением степени деформации прокаткой толщина околошовной зоны постепенно уменьшается. При относительном обжатии полосы 49 % со стороны слоя стали 08Х18Н10Т свойства стали и сварной зоны с увеличением числа проходов выравниваются. Для околошовной зоны со стороны стали 10 этого не наблюдается, при обжатии 49 % можно выделить некий промежуточный пограничный слой, отличающийся по свойствам от стали 10 и от второго материала биметалла.

По мере увеличения степени деформации прокаткой происходит уменьшение волнообразности сварной границы, с каждым проходом вплоть до четвертого толщина промежуточного слоя уменьшается, после пятого прохода (суммарное относительное обжатие 49 %) происходит выравнивание механических свойств по объему составляющих биметалл материалов и появляется четкая как по механическим свойствам, так и по визуальному наблюдению сварная граница.

Таким образом, сварной шов оказывает существенное влияние на механические свойства недеформированного биметалла в целом и требует тщательного анализа. Рассмотрение поэтапной деформации сварного шва с помощью индентирования позволяет выделить основные закономерности поведения сварной границы и дать практические рекомендации для дальнейшего производства и использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-38-60169.

THE MECHANICAL TESTING OF COMPOSITE SHELL MATERIAL OF COMPOSITE OVERWRAPPED PRESSURE VESSEL

Moskvichev E.V.

SDTB "Nauka" ICT SB RAS, P.O. box 25515, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation,
e-mail: jugr@icm.krasn.ru

Composite overwrapped pressure vessels are widely used in advanced space structures such as communications satellites, providing the highest weight efficiency and durability. The high responsibility of these structures brings to the fore the problems of strength and reliability of composite overwrapped pressure vessels. This requires the use of advanced techniques for strength analysis including numerical modeling and material testing.

The composite pressure vessel discussed in this paper is made by continuous winding of fibrous tapes on a titanium liner forming the composite shell of complex structure with varying mechanical properties. The paper presents the approach to experimental determination of mechanical properties of the composite shell including cutting scheme, method of specimen preparation and testing procedure.

The carried three-point bending and tensile tests allowed assessing the elastic modulus of composite material along and across fibers and ultimate strength. These assessments may be used in numerical modeling of composite overwrapped pressure vessel as also in comparative analysis of manufacturing technology in order to achieve the suitable strength properties.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation according the agreement No. 14.607.21.0038 under the Federal Program "Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014-2020", project No. RFMEFI60714X0038.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОГО ОЛИГОМЕРА, НАПОЛНЕННОГО ДИОКСИДОМ КРЕМНИЯ, С ПОМОЩЬЮ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ

Смирнов С.В., Веретенникова И.А., Смирнова Е.О.

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

Работа посвящена исследованию влияния содержания и технологии введения наночастиц диоксида кремния в эпоксидные смолы на их механические свойства на микро- и мезомасштабных уровнях. Для проведения исследований методом индентирования по ISO 14577 при нагрузках до 10 мН использовали наномеханический комплекс Hysitron NanoTriboindentor TI 950, при нагрузках от 1 до 2000 мН – систему FISCHERSCOPE HM2000 XYm. Испытывали образцы материала Праймер 204, представляющего собой соединение эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 и полиэтиленполиамина (отвердителя) при добавке наноразмерного порошка диоксида кремния Таркосил. Порошок был получен на электронном ускорителе путем испарения исходного вещества под действием электронного пучка, созданного электронным ускорителем с дальнейшей конденсацией высокотемпературного пара в виде наночастиц. Средний размер частиц оксида кремния составляет около 20 нм. Рассматривали образцы с объемным содержанием наночастиц 2%; 4%; 6%; 8%, 20%. Материалы для исследований предоставлены ИТПМ СО РАН. По результатам анализа диаграмм вдавливания были получены следующие результаты.

Материал Праймер 204 проявляет вязкостные свойства как субмикро – , так и на микроуровне. Чем меньше нагрузка, тем сильнее скорость нагружения влияет на диаграммы индентирования, текущую и максимальную твердость, глубину вдавливания индентора. Материал склонен к проявлению эффекта ползучести под нагрузкой. Установленные закономерности описаны количественно в виде аналитических зависимостей с эмпирическими коэффициентами.

Установлено, что имеет место единая зависимость напряжения деформирования от скорости нагружения на микро- и мезомасштабных уровнях. Полученная закономерность описана аналитической зависимостью. Показано, что твердость, нормальный модуль упругости, соотношение между упругой и пластической составляющей деформации имеют возрастающую экспоненциальную зависимость от скорости нагружения

Варьирование времени выдержки постоянной нагрузки при достижении максимальной глубины вдавливания индентора позволило определить и аналитически описать зависимости скорости микроползучести и релаксации напряжений от времени.

Установлено, что микромеханические свойства матрицы практически не зависят от содержания наполнителя, что связано с тем, что наночастицы агломерируются в крупные образования, а не рассеиваются в матрице. Поэтому рост прочностных свойств на макроуровне связан не с дисперсионным упрочнением, а с увеличением объемного содержания более прочной компоненты, в качестве которой выступает диоксид кремния Таркосил.

Следствием предыдущего вывода является то, что эпоксидные смолы Праймер-204 и ЭД-20, модифицированные диоксидом кремния, при моделировании могут рассматриваться как двухкомпонентный композит. Это было подтверждено удовлетворительным совпадением экспериментальных данных с результатами расчетов по формулам «равных напряжений» и «равных деформаций» из теории механических смесей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 16-08-01154 А.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УПРУГИХ ВОЛН НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЖЕСТКОЙ ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

Чертова Н.В., Гриняев Ю.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской Академии наук, д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634021, Российская Федерация, e-mail: chertova@ispms.tsc.ru

Свободные поверхности и жесткие границы раздела являются важными элементами структуры реальных иерархически организованных материалов и сред, к числу которых относятся пористые среды и упрочненные материалы с жесткими включениями. Рассматриваемые границы оказывают существенное влияние на физические и эксплуатационные свойства материалов, определяемые закономерностями деформирования и разрушения. Экспериментальные методы исследования не позволяют детально изучать динамику вкладов и взаимодействий различных мод деформаций, а также эффекты, обусловленные наличием свободных поверхностей и жестких границ раздела, поэтому теоретические подходы и методы численного моделирования приобретают особо значение при изучении особенностей динамических деформаций на границах раздела.

Чтобы проанализировать характер деформаций на свободных поверхностях и жестких границах раздела и определяемые ими особенности деформирования, рассмотрим закономерности отражения упругой волны. Традиционной целью такой задачи является нахождение коэффициентов отражения и потоков энергии первичной и вторичных волн. В настоящей работе коэффициенты Френеля использованы для анализа различных мод деформации, характеризующих формоизменение бесконечно малого элемента среды и его поворот на границе раздела.

Из равенства нулю напряжений на свободной поверхности следует равенство нулю деформации сдвига. Удлинения, определяющие объемные изменения, выражаются через коэффициенты отражения продольной волны при падении первичной волны любой поляризации. Установлено, что удлинения связаны линейным соотношением, поэтому характер объемных изменений на свободной поверхности и ненулевой компоненты напряжений аналогичен. Определены углы падения волн, при которых рассматриваемые компоненты обращаются в нуль. В отличие от сдвига поворот отличен от нуля на границе и определяется коэффициентом отражения поперечной волны. Проанализировано соотношение амплитуд удлинений и поворота на свободной поверхности, остающееся неизменным во всем интервале углов падения продольной волны и различное в случае падающей поперечной волны.

При отражении волн на жесткой границе раздела в случае идеального контакта, коэффициент отражения поперечной волны определяет значения поворота и деформации сдвига, а также сдвиговых напряжений на границе. Удлинение вдоль жесткой границы равно нулю, поэтому объемные изменения определяются компонентой, направленной по нормали к границе, и коэффициентом отражения продольной волны, как и диагональные компоненты напряжений.

Таким образом, свободная поверхность в процессе деформации является областью объемных изменений и поворотов. Поворот и деформация сдвига, сопровождающие распространение отраженных на свободной поверхности волн, являются величинами одного порядка, что указывает на необходимость рассмотрения обеих величин при описании деформации материалов и сред имеющих свободные поверхности в качестве границ. Деформация сдвига и поворот на жесткой границе раздела равны между собой, что также указывает на необходимость использования трансляционных и вращательных мод деформации при описании сред с границами раздела и учета связанной с ними энергии деформирования.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020гг. В части обоснования появления вихревых мод деформации при отражении упругих волн на свободной поверхности и жесткой границе раздела работа поддержана грантом 14-19-00718 Российского научного фонда.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА 01560 ПОСЛЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Смирнов А.С. [1], Смирнова Е.О. [1], Александров С.Е. [2], Муйземнек О.Ю. [1]

[1]*ФБГУН Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: evgeniya@imach.uran.ru*

[2]*ФБГУН Институт проблем механики РАН, д. 101, корп.1, пр. Вернадского, г. Москва, 119526, Российская Федерация*

Известно, что вблизи поверхности контакта двух материалов при их совместном деформировании могут возникать тонкие слои, свойства которых значительно отличаются от свойств в основном объеме каждого из материалов. Пластическая деформация металла в этих слоях, связанная преимущественно с развитием сдвиговых процессов, определяет формирование деформационной структуры материала, его упрочнение, трещиностойкость и другие важнейшие характеристики материала.

Целью настоящей работы является апробация методики определения толщины измененного при контакте с шероховатым деформирующим инструментом с помощью использования результатов исследования нанотвердости и формирования сетки малоугловых границ. Данная работа выполняется в рамках решения актуальной проблемы механики деформированного твердого тела, связанной с развитием методов адекватного описания процесса формирования границы между двумя разнородными материалами. Результаты в дальнейшем будут сравнены с теоретически определенной толщиной слоя на основе численного решения.

Для получения деформированного слоя на границе контакта двух разнородных материалов были проведены эксперименты по проталкиванию цилиндрического образца через нешлифованную стальную матрицу с полууглом конусности 1,15 градуса. Этим достигались благоприятные условия для возникновение дополнительной деформации сдвига вблизи поверхности трения. В качестве исследуемого материала был выбран алюминиевый деформируемый сплав 01560. Для определения прочностных свойств и толщины деформированного слоя были применены два метода исследования – кинетическое наноиндентирование и метод дифракции обратнорассеянных электронов (ДОРЭ). Кинетическое наноиндентирование выполняли на испытательном комплексе для наномеханических испытаний Nanotriboindentor TI950 в плоскости продольного сечения образца при максимальной нагрузке 10 мН на индентор Берковича. По результатам измерений были построены графики распределения нанотвердости и приведенного модуля упругости от края поверхности контакта в продольном сечении к центру образца вдоль линий измерения. Исследование микроструктуры выполняли методом ДОРЭ на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU с приставкой для анализа EBSD OXFORD HKLNordlysF+. В частности, были определены распределения доли длины малоугловых границ в плоскости продольного сечения образца от края образца к центу. Оба метода (кинетическое наноиндентирование и ДОРЭ) показали существование деформированного слоя вблизи поверхности контакта, количественные оценки толщины слоя оказались также близки.

Работа выполнялась в соответствии с планом исследований по проекта РНФ № 14-11-00844.

ОПИСАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ДВУХЧАСТОТНЫХ ЗАКОНАХ НАГРУЖЕНИЯ

Янкин А.С., Бульбович Р.В., Словиков С.В., Вильдеман В.Э.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: yas.cem@yandex.ru, dekan_akf@pstu.ru, sslovikov@ya.ru, wildemann@pstu.ru

Целью работы является разработка экспериментальной методики исследования динамических свойств высоконаполненных полимеров при двухчастотных нагрузках и процедуры идентификации многофакторной математической модели для оценки напряженно-деформированного состояния вязкоупругих конструкций аэрокосмической техники.

Для наполненных полимеров свойственно нелинейное поведение при деформировании: отличие петли гистерезиса от эллиптической формы [1], размягчение материала (эффект Маллинза – Патрикеева) [1, 2], влияние амплитуды деформации (эффект Пэйна) [1, 2] и предварительной статической деформации на определяемые параметры [1]. В связи с этим для описания нелинейного поведения материала использовался кратно-интегральный ряд Вольтерры. После всех преобразований были приведены соотношения между напряжениями и деформациями при стационарных двухчастотных нагрузках.

В рамках исследования были разработаны методики проведения эксперимента и определения вязкоупругих параметров высоконаполненных полимеров при двухчастотных нагрузках [3–5], проведены экспериментальные исследования с целью выявления зависимостей вязкоупругих характеристик от различных параметров и условий нагружения [6–8].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-31-00230 мол_а).

Литература

1. Адамов А.А., Матвеенко В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Методы прикладной вязкоупругости. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2003. – 411 с.

2. Морозов И.А., Свистков А.Л. Структурно-феноменологическая модель механического поведения резины // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2008. – Т.14. – №4. – С.583-596.

3. Янкин А.С., Словиков С.В., Бульбович Р.В. Определение динамических механических свойств низкомодульных вязкоупругих композитов при бигармоническом законе нагружения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2013. – Т.19. – №1. – С.141–151.

4. Янкин А.С., Бульбович Р.В., Словиков С.В., Вильдеман В. Э. Методические вопросы экспериментальных исследований вязкоупругих наполненных полимерных композитов при сложных динамических циклических воздействиях // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – №4 – С.180–192.

5. Янкин А.С., Бульбович Р.В., Словиков С.В., Вильдеман В.Э. Павлоградский В.В. Вязкоупругие характеристики высоконаполненных полимерных композитов при двухчастотных воздействиях // Механика композитных материалов. – 2016. – Т. 52, № 1. – С. 115–128.

6. Янкин А.С., Бульбович Р.В., Словиков С.В., Вильдеман В. Э. Влияние амплитуды деформации высокочастотной составляющей бигармонического (двухчастотного) закона нагружения на динамические механические свойства низкомодульных вязкоупругих композитов // Механика композитных материалов. – 2013. – Т. 49, №6. – С.1005–1012.

7. Янкин А.С., Бульбович Р.В., Словиков С.В., Вильдеман В.Э. Особенности поведения низкомодульных вязкоупругих полимерных композитов при варьировании амплитуды деформации низкочастотной составляющей бигармонической нагрузки // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – № 3. – С. 233–251. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.11

8. Янкин А.С. Влияние частот бигармонического (двухчастотного) нагружения на механическое поведение имитатора твердого топлива // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – №4. – С.273–292. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.16

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Комаров О.Н., Жилин С.Г., Потянихин Д.А., Предеин В.В., Абашкин Е.Е., Соснин А.А., Попов А.В.

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: zhilin@imim.ru

Приоритетными направлениями развития машиностроительных предприятий является выпуск конкурентоспособной продукции с низкой себестоимостью и повышенными эксплуатационными характеристиками. Использование в качестве шихтового материала смеси из таких отходов металлургических и машиностроительных предприятий (ОММП), как окалина, стружка черных и цветных металлов в процессах их алюмотермитной переработки соответствуют этому направлению. В основу процесса положена экзотермическая окислительно-восстановительная реакция, в ходе которой происходит восстановление железа из ОММП с получением расплава стали [1, 2]. Для доведения стали по химическому составу, соответствующему требуемой марке используют различные лигатуры и модификаторы [3]. Соотношение и фракционный состав шихтовых компонентов определяют интенсивность процесса, химический состав, структуру и физико-механические свойства получаемой стальной отливки. Прочностные характеристики изделий из таких сталей, химический состав которых соответствует марочным, отличаются от последних ввиду различий в структурах.

Применяющаяся в качестве восстановителя стружка алюминиевых сплавов содержит в своем составе значительную долю примесей других металлов: меди, магния, марганца кремния, цинка и т.д. Такие примеси в результате прохождения экзотермической реакции, в зависимости от ее параметров, перераспределяются между образующимися фазами металла, шлака и газа. Установлено что медь в процессе переплава до 92% усваивается термитным металлом. В связи с этим наиболее предпочтительным представляется использование экзотермического процесса для получения отливок из сплавов с содержанием меди не менее 1%, характеризующихся достаточной вязкостью и предназначенных для эксплуатации в высоконагруженных условиях, например, стали 12ДН2ФЛ и 20ДХЛ. Актуальной при осуществлении процесса представляется задача, связанная с выбором соотношения компонентов термитной смеси, в которых примеси металлов и активный алюминий восстановителя присутствуют в пропорциях, определяющих структуру получаемого слитка.

Целью исследований является определение влияние структуры на прочностные свойства литейной стали, полученной с использованием термитных материалов.

В рамках исследований проведены практические эксперименты по получению расплава металла, образовавшегося в результате экзотермической реакции из смеси окалины, восстановителя и легирующих элементов, определено содержание химических элементов в структуре слитка получаемых сплавов после его затвердевания. Установлено, что предел прочности на разрыв полученных сплавов, в ряде случаев превышает этот показатель для стали 20ДХЛ, полученной традиционным способом литья на 60%. Условия и параметры экзотермического процесса определяют наличие в структуре слитка зерен различных размеров, по границам которых присутствуют фазы промежуточного превращения.

Литература

1. В.А. Новохацкий, А.А. Жуков, Ю.И. Макарычев Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями - М.: Машиностроение, 1986. – 64 с.

2. О.Н. Комаров, И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, В.В. Предеин. Термохимические процессы получения отливок из термитной шихты в графитовых оболочковых формах. Металлургия машиностроения. 2013. № 6. С.33-37

3. Комаров О.Н., Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Попов А.В. Особенности получения металлошихты из отходов машиностроительных предприятий // Фундаментальные исследования. №12, 2015, С.914-918

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ И БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ КОМПОЗИТОВ

Петухова Е.С.[1], Красникова И.В.[2]

[1]*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677891, Российская Федерация, e-mail: evgspar@rambler.ru*

[2]*ФГБУН Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, д. 5, пр. Академика Лаврентьева, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация*

Углеродные и базальтовые волокна широко используются для армирования полимерных композиционных материалов. Однако при разработке таких композитов исследователи сталкиваются с проблемой низкого уровня адгезии на границе раздела фаз волокно/полимер, обусловленного «гладкостью» исходных волокон. В работе для изменения поверхностных свойств волокон предложено использовать методику синтеза углеродных нановолокон на их поверхности.

Наноструктурирующие покрытия были получены методом каталитического разложения углеводородов в реакторе роторного типа, разработанным в Институте катализа СО РАН в лаборатории мембранных каталитических процессов. Установлено, что удельная площадь поверхности таких волокон возрастает в 1,5-25 раз по сравнению с исходными. Толщина модифицирующего слоя в зависимости от условий синтеза составляет от 50 нм до нескольких мкм. Морфологическая структура и толщина нанонитей, формирующихся в результате процесса также существенно зависят от параметров синтеза. Толщина нановолокон колеблется от 10 до 200 нм, морфологические структуры представлены коаксиально-коническими и перистыми образованиями. Кроме того, тип образующихся углеродных структур определяется природой подложки. На поверхности базальтовых волокон, кроме углеродных нановолокон, обнаружены участки покрытые частицами аморфизированного углерода.

В работе были исследованы композиты трубного назначения на основе ПЭ100 различных марок. В качестве наполнителей использовали рубленые (5-6 мм) углеродное и базальтовое волокна. Количество вводимого наполнителя составляло 5-10 мас. %. Установлено, что физико-механические характеристики полиэтиленовых композитов, содержащих в качестве наполнителя исходные и поверхностно-модифицированные волокна, в значительной степени зависят от марки ПЭ. В общем случае композиты характеризуются существенным ростом модуля упругости и предела текучести при растяжении. Деформационные характеристики снижаются, однако, композиты, содержащие модифицированный наполнитель, характеризуются более высокими значениями удлинения при разрыве и удлинения при пределе текучести.

Исследование особенностей взаимодействия на границе раздела фаз волокно/полимер методом электронной сканирующей микроскопии позволяет идентифицировать образование дополнительных адгезионных связей между модифицированным волокном и ПЭ. Следует отметить, что плотность таких связей определяется структурой наномодифицирующего слоя. Наибольшая эффективность применяемого приема наноструктурирования поверхности армирующих волокон обнаруживается в случае использования волокон с минимальной толщиной и максимальной равномерностью нанослоя.

Литература

1. Токарева И.В., Мишаков И.В., Ведягин А.А., Корнеев Д.В., Петухова Е.С., Саввинова М.Е. Модифицирование углеволокон для армирования трубного полиэтилена ПЭ80// Композиты и наноструктуры. Т. 6., № 3, 2014. С. 158-167.

2. Мишаков И. В., Буянов Р. А., Стрельцов И. А., Ведягин А. А. Технология получения углеродных наноразмерных нитей по механизму карбидного цикла //Катализ в промышленности. – 2008. – №2. – С. 26 – 31.

3. Y. Luo, Y. Zhao, Y. Duan, S. Du, *Mater. Design.* 2011, *32*, 941.

THE PRESSING PARAMETERS DEPENDENCE FOR THE COMPACTION OF REFRACTORY METALS POWDERS

Shubina A.N. [1], Beketov A.R. [2], Obabkov N.V. [2], Iskhakov R.F. [2]

[1] *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya st., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation, e-mail:* shubina@imach.uran.ru

[2] *Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation*

Целью работы является экспериментальное определение компрессионных кривых для низколегированного молибденового сплава в зависимости от содержания пластификатора при использовании различных схем одностороннего или двухстороннего прессования.

Результаты: При реализации технологических процессов производства металлоизделий из тугоплавких металлов достигается сравнительно низкий выход годного. Выход годного в этих процессах определяется этапом порошковой металлургии и последующим спеканием. В технической литературе не приводится универсальных и надежных рекомендаций по степени уплотнения порошка при формовании, и оптимальной концентрации пластификатора (например, раствора глицерина в спирте, или парафина в бензине).

В представленной работе проведен анализ влияния давления прессования и количества вводимого в качестве пластификатора на уплотняемость порошка молибденового сплава при изготовлении цилиндрических брикетов. Прессование заготовок осуществлено на экспериментальной установке с разъемным контейнером диаметром, установленной на горизонтальном гидравлическом прессе кафедры ОМД УрФУ (ИММт).

Выводы: В работе определены рациональные параметры формования порошков низколегированного молибденового сплава, в т.ч. коэффициенты уплотнения и объем используемого пластификатора. Определены аппроксимирующие уравнения для зависимости коэффициентов уплотнения молибденового сплава от давления прессования. Работа выполнена под руководством профессора кафедры Обработка металлов давлением Буркина С.П. (ИММт УрФУ).

References

1. Патент РФ №2324595. Устройство для формования длинномерных заготовок из порошковых материалов / Буркин С. П., Бекетов А. Р., Логинов Ю. Н. и др.; заявл. 05.04.2006; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14.

2. Буркин С. П., Андрюкова Е. А., Бекетов А. Р., Обабков Н. В., Брынских Я. И. Силовые параметры формования штабиков из порошков тугоплавких металлов // Цветные металлы. 2009. № 12

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТОВ ИЗ ТИТАНОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Залазинский А.Г., Крючков Д.И., Титов В.Г.

Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: kru4koff@bk.ru, zul@imach.uran.ru, tit@imach.uran.ru

Производство коррозионностойких деталей из титаносодержащего сырья возможно методом порошковой металлургии. В частности, для формования таких изделий широко применяется горячее изостатическое прессование (ГИП). Несмотря на все достоинства, технология ГИП требует применения специализированного дорогостоящего оборудования, процесс характеризуется многостадийностью, высокими энергетическими затратами и малой производительностью. Это обуславливает необходимость проведения исследований с целью установления возможности применения более простых методов формования, в частности холодного прессования заготовок с их последующим спеканием. Применение компьютерного моделирования совместно с подходами механики структурно-неоднородных тел и многокритериальной оптимизации открывает новые возможности комплексного анализа уплотнения, формоизменения и консолидации частиц, что позволяет совершенствовать процессы формования без применения уникального экспериментального оборудования.

Для решения задач механики деформирования композитов из порошкообразного сырья в ИМАШ УрО РАН разработан гибридный моделирующий комплекс. Комплекс представляет собой проблемно-ориентированную оболочку, интегрирующую CAD/CAE системы с системой компьютерной математики, построенную на базе математических библиотек языка Python. Для каждого типа задач разработан программный модуль с интерфейсом конкретной задачи, в который вводятся данные, с возможностью варьирования основных технологических параметров исследуемых процессов.

Решатель программного комплекса формирует выходной файл базы данных, который передается в модуль Visualization, где обрабатывается, формируя выходные данные в графическом и текстовом видах. Выходные данные накапливаются в базе данных и передаются в математическую подсистему, в которой по окончанию набора данных вычислительного эксперимента, обрабатываются методом регрессионного анализа. Для решения задач многокритериальной оптимизации, с возможным наличием конфликтующих между собой параметров, использованы генетические алгоритмы в среде MATLAB.

С целью выбора оптимального состава порошкового композита на основе титана для производства изделий, работающих в условиях циклических силовых и температурных нагрузок, стойких к воздействию агрессивных сред для исследований выбрали порошок из сплава ВТ-22 $(Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe)$, предназначенного для изготовления конструкционных нагруженных деталей [8].

В качестве добавок выбраны: титан полученный гидридно-кальциевым способом ПТМ-1 и медь полученная электролизом солей ПМС-1. ПТМ-1 относится к восстановленным порошкам титана, имеет неправильную (иррегулярную) форму и развитую поверхность частиц, благодаря чему отлично формуются при сравнительно низких давлениях прессования.

Осуществлено компьютерное моделирование процесса прессования порошкового материала, представляющего механическую смесь порошков ВТ-22 и титана марки ПТМ-1 с процентным содержанием 50/50 и 75/25. Результаты моделирования позволили расширить представления о состоянии структурных компонентов композитных материалов в процессе деформирования, в частности изучить изменение геометрии частиц при уплотнении.

Таким образом, для получения изделий с высокой прочностью и плотностью с учетом фактора снижения стоимости исходного материала наиболее перспективным является состав ВТ-22(70%)+ПТМ-1(25%)+Cu(5%), причем для увеличения плотности заготовок рекомендуется поднять давление прессования до 1000 МПа.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЕРШИНЫ НАДРЕЗА НА ХАРАКТЕР ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12Х1МФ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ: ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моисеенко Д.Д.[1], Максимов П.В.[1], Панин С.В.[1,2], Панин В.Е.[1,2]

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

[2]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация, e-mail: svp@ispms.tsc.ru*

Проведен анализ распределения полей напряжений на мезомасштабном уровне на примере образцов стали 12Х1МФ с V-, U- и I-образным надрезами при ударном нагружении. Для компьютерного моделирования зарождения и последующей эволюции полей напряжений в условиях интенсивных динамических нагрузок был развит дискретно-континуальный метод возбудимых клеточных автоматов. Каждый элемент такого автомата характеризуется определенным набором соседей на первой координационной сфере, а также числовыми параметрами, соответствующими материалу, содержащемуся в моделируемом объёме пространства, такими как: модуль упругости, плотность, модуль сдвига, плотность дислокаций, теплопроводность, удельная теплоёмкость, коэффициент температурного расширения и др. При взаимодействии с соседними элементами изменяются тепловая и механическая составляющие энергии и связанные с ними параметры (температура, энтропия, напряжение, деформация, плотность и т.д.). В основе использованного в данной работе метода моделирования лежит теория эволюции полей моментных напряжений, инициирующих обратимые структурно-фазовые трансформации и формирование вихревых структур на границах раздела [1, 2]. В свете многоуровневого подхода материал представляется как совокупность 3D кристаллической системы и 2D подсистемы всех границ раздела, вдоль которых генерируются ротационно-волновые потоки массы и энергии.

С привлечением метода возбудимых клеточных автоматов проведено численное моделирование деформационного поведения образцов с надрезами разной формы. Численное моделирование деформационного поведения образцов с V-, U- и I-образным надрезами показало, что в случае наиболее «тупого» надреза максимум ударной вязкости обеспечивается за счет более однородного распределения нагрузки по его периметру, что позволяет при отрицательной температуре испытаний исключить его хрупкое разрушение. В образце с наиболее острым надрезом деформация хоть и локализуется в области его вершины, но полосы локализованного сдвига оказываются ориентированными не по направлениям максимальных касательных напряжений, а по нормали к оси приложения нагрузки. Это также позволяет задержать макролокализацию деформации и рост трещины. Проведенное моделирование позволило объяснить причины наблюдаемого ранее экспериментально [3, 4] увеличения ударной вязкости образцов с I-образным надрезом по сравнению V-образным.

Литература

1. Panin V.E., Egorushkin V.E. Deformable solid as a nonlinear hierarchically organized system // Phys. Mesomech. – 2011. – V. 14. – No. 5–6. – P. 207 – 223.

2. Moiseenko D.D., Panin V.E., Elsukova T.F. Role of local curvature in grain boundary sliding in a deformed polycrystal // Phys. Mesomech. – 2013. – V. 16. – No. 4. – P. 335 – 347.

3. Panin S.V., Maruschak P.O., Vlasov I.V., Moiseenko D.D., et. al. The role of Notch Tip Shape and Radius on Deformation Mechanisms of 12Cr1MoV Steel under Impact Loading. Part 1. Energy parameters of fracture // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. - 2016 (to be published).

4. Panin S.V., Maruschak P.O., Vlasov I.V., Moiseenko D.D., et al. The role of Notch Tip Shape and Radius on Deformation Mechanisms of 12Cr1MoV Steel under Impact Loading. Part 2. Influence of Deformation Localization on Fracture Behavior // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. - 2016 (to be published).

ВЕКТОРИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ МОДУЛЯ ЮНГА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ГПУ-СТРУКТУРОЙ

Серков К.В., Берестова С.А., Митюшов Е.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация, e-mail: k.v.serkov@urfu.ru, s.a.berestova@urfu.ru, mityushov-e@mail.ru

В рамках доклинических исследований остеоинтеграции с применением инновационного имплантата в Уральском федеральном университете изготавливаются образцы методом 3D-печати на основе спекания порошков Zr, либо Ti. В работе приводится сравнение упругих свойств данных материалов с ГПУ-структурой на примере векториальных моделей, характеризующих зависимость модуля Юнга от направления.

Для построения векториальной модели зависимости модуля Юнга из одной точки проводят радиус-векторы, длины которых пропорциональны величине, характеризующей в данном направлении модуль упругости. Ориентационная зависимость модуля Юнга поликристаллического материала с гексагональной симметрией текстуры в приближении Ройсса в проекции на одну из координатных плоскостей описывается соотношением:

$$E^{-1}(\varphi)=S_{11}-[(2S_1+S_2)/2]*(\Delta_1+\Delta_2)+(3S_3/8)*(2\Delta_1+2\Delta_2+\Delta_5-1)+1/2[S_3(\Delta_3-\Delta_4)-(2S_1+S_2)*$$
$$*(\Delta_1-\Delta_2)]\cos(2\varphi)+S_3/8(4\Delta_3+4\Delta_4-3\Delta_5-6\Delta_1-6\Delta_2+3)\cos(4\varphi),$$

$$S_1=S_{12}-S_{13},\qquad S_2=S_{66}-S_{44},\qquad S_3=S_{12}+S_{33}-S_{44}-2S_{13},\qquad S_{11}-S_{12}=1/2S_{66},$$

где E- модуль Юнга, S_{ij}- компоненты тензора эффективных коэффициентов податливости в матричной форме записи, φ – угол, определяющий в координатной плоскости направление измерения модуля Юнга, Δ_i –текстурные параметры поликристалла с гексагональной симметрией текстуры, являющиеся осредненными интегральными характеристики кристаллографической текстуры поликристаллического материала.

На основе данных об упругих свойствах монокристаллов с гексагональной структурой и информации о преимущественном распределении кристаллографических осей в поликристаллическом материале были произведены расчеты компонентов тензора эффективных коэффициентов податливости. Произведено сравнение сплавов Zr и Ti, которые наиболее часто используются при изготовлении имплантатов методом 3D печати. Отмечены преимущества сплавов Ti. Построены также векториальные модели в различных текстурных состояниях сплавов Ti. Рассмотрены квазиизотропное состояние материала, модельные текстуры, а также реальные текстуры, информация о которых была получена экспериментальным путем другими авторами. Показано качественное отличие упругих свойств в зависимости от данных об упругих свойствах монокристалла, а также существенное влияние преимущественной ориентации кристаллографических осей в поликристалле на анизотропию модуля Юнга материалов, применяемых при изготовлении имплантатов. Информацию об анизотропии упругих свойств, в частности, модуля Юнга необходимо учитывать при выборе исходных материалов и способах обработки образцов.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕДЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНЫХ ЗОН ТРУБЫ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПРИ УПРУГОМ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ (СЖАТИИ)

Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А.

ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: us@imach.uran.ru

Проведен сравнительный анализ влияния величины предварительной пластической деформации, моделирующей исходное напряженно-деформированное состояние (НДС) изделия, на поведение магнитных характеристик металла различных зон трубы большого диаметра, изготовленной из трубной стали класса прочности Х70, при последующем упругом одноосном растяжении и сжатии.

Объектом исследования служили три группы плоских разрывных образцов, вырезанных соответственно из основного металла, сварного шва и околошовной зоны трубы диаметром 1420 мм. На первом этапе образцы подвергали одноосному растяжению до различных значений пластической деформации, после чего определяли их магнитные характеристики. На втором этапе проводили упругое растяжение (сжатие) с последующим разгружением предварительно пластически деформированных образцов, полученных на первом этапе, с измерением магнитных характеристик как в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеаметра, так и с использованием накладных преобразователей в полузамкнутой магнитной цепи.

Экспериментальные результаты по влиянию величины предварительной пластической деформации одноосным растяжением на зависимости магнитных характеристик от упругих приложенных напряжений металла различных зон сварных труб большого диаметра показали качественное подобие этих зависимостей.

Установлено, что основной металл, материал сварного шва и околошовной зоны исследованной трубной стали класса прочности Х70 обладают различной структурой. Материал шва исследованной стали имеет большую дисперсность по отношению к основному металлу и тем более к материалу ОШЗ, где происходит формирование крупнозернистой структуры.

Различия в структуре и соответственно в исходном уровне магнитных свойств исследованных материалов обуславливают количественные отклонения в изменении их магнитных характеристик как при предварительной пластической деформации, так и в условиях последующего упругого одноосного растяжения (сжатия).

Показано, что в качестве параметров для оценки пластической деформации металла отдельных зон сварного соединения, которая возникла в процессе изготовления, транспортировки и монтажа трубы и которую необходимо учитывать в дальнейшем, при контроле состояния трубопровода в процессе эксплуатации, могут быть использованы коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость, измеренные в соответствующих участках сварного соединения.

Определен комплекс магнитных характеристик, однозначно изменяющихся в интервале приложенных упругих напряжений от -200 до 120 МПа, перекрывающем диапазон рабочих давлений в трубопроводе, для каждого из исследованных участков сварной трубы, что позволяет использовать данные магнитные характеристики или их комбинацию в целях оценки текущего состояния отдельных зон сварных соединений трубы.

При выполнении настоящей работы для проведения измерений магнитных характеристик было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН, проект № 15-10-1-22.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ДЕНТИНА

Кабанова А.В.[1], Панфилов П.Е.[1], Занг З.[2], Кисельникова Л.П.[3]

[1] *Институт естественных наук, УрФУ, д. 51, пр. Ленина, г. Екатеринбург, 620083, Российская Федерация, e-mail: gerbers13@mail.ru, peter.panfilov@urfu.ru*

[2] *Институт материаловедения им. Э. Шмида, д. 12, ул. Jahnstrasse, г. Леобен, 8700, Австрия, e-mail: zaoli.zhang@oeaw.ac.at*

[3] *МГМСУ, д. 20 стр. 1, ул. Делегатская, г. Москва, 127473, Российская Федерация*

Дентин – твердая ткань, обладающая иерархической структурой и состоящая из органических и неорганических компонент в объемном соотношении 1:1. Прочностные свойства зубов человека зависят от соотношения органической и минеральной составляющих дентина и структурного состояния гидроксиапатита в нем. Целью работы является изучениеь структуры подросткового коронкового дентина на нано-уровне методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Премоляры пациентов подросткового возраста разрезали на образцы перпендикулярно главной оси зуба. Тонкие фольги для ПЭМ получали путем химического утонения в потоке концентрированной ортофосфорной кислоты. Исследование проводили на TEM/STEM JEOL2100F (ускоряющее напряжение 200кВ).

Было показало, что подростковый коронковый дентин имеет слоистую морфологию, толщина слоев 50-100нм, а слои располагаются перпендикулярно главной оси зуба. На тонких участках около пульповой виден твидовый контраст, который указывает на то, что материал находится либо в аморфном, либо нано-кристаллическом состоянии. Действительно, на электронограммах, снятых с тонких участков фольг наблюдается диффузионное гало, характерное для аморфных твердых тел.

На участках фольги около границы с эмалью видны сетки, образованные волокнами коллагена произвольной ориентировки. Волокна имеют толщину порядка 5нм, что соответствует литературным данным о средней толщине волокна тропоколлагена. Элементный анализ, выполненный с помощью EDXA спектрометра, показал, что в фольгах подросткового коронкового дентина присутствуют составляющие гидроксиапатита кальция (Ca, P, O, C). Анализ электронограмм с этих участков показывает, что дентин, включая его минеральную составляющую, находится в аморфном состоянии. Таким образом, можно сделать вывод, что гидроксиапатит кальция в подростковом коронковом дентине находится преимущественно в аморфном состоянии. Выделения частиц гидроксиапатита в подростковом коронковом дентине не наблюдалось.

Трещины появлялись в образцах в процессе приготовления образцов. В тонких фольгах трещины распространяются от края к центру образца. Угол раскрытия трещины составляет примерно 30°. Его свободный край трещины имеет эллипсоидальной профиль, в то время как ее край возле вершины трещины содержит микротрещины, которые выглядят как микропоры. Подобный тип поведения трещин присущ упруго-пластическим полимерным пленкам. Перед вершиной трещины всегда имеется светлый участок, окруженный непрозрачным материалом. Причиной появления прозрачной области в окрестности вершины трещины является утонение дентина за счет необратимой / пластической деформации впереди трещины. Эту светлую узкую полоску можно рассматривать как пластическую зону в окрестностях вершины трещины. Подобный характер роста трещин хорошо согласуется с механическими свойствами дентина.

Работа выполняется при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-04073а., КАВ и РНФ (грант № 15-19-10007, ППЕ).

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ ЗАКАЛЕННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Макаров А.В.[1, 2], Давыдова Н.А.[2], Малыгина И.Ю.[2], Саврай Р.А.[2]

[1]*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация*

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail:* davydova@imach.uran.ru

Для создания термически устойчивых нанокристаллических слоев с максимально высоким комплексом физико-механических характеристик актуальными представляются исследования по оптимизации их химического и фазового состава за счет оптимального легирования металлических сплавов. Цель данного исследования заключалась в изучении влияния дополнительного легирования Si, Cr и Ni на твердость и сопротивление термическому разупрочнению нанокристаллических структур (НКС), сформированных в сталях при фрикционной обработке (ФО) скользящими инденторами.

В качестве материала для исследования были взяты легированные стали 20ХН3А, 40Х, 20ХН3А (цементованная), 80С2 и 80С4. Для сравнения использовали углеродистые стали 20, 40 и У8. С целью формирования мартенситной структуры стали подвергали объемной или лазерной (для стали 20) закалке. Интенсивное диспергирование мартенситной структуры поверхностного слоя при ФО вплоть до нанокристаллического состояния обеспечивает значительное повышение микротвердости всех исследуемых сталей: от 4,4 до 9,4 ГПа – у низкоуглеродистых; от 6,4-6,6 до 11,0-11,5 ГПа – у среднеуглеродистых и от 9,4-9,5 до 11,2-12,4 ГПа – у сталей эвтектоидного состава. Однако НКС трения цементованной стали 20ХН3А (11,5 ГПа) имеют меньший уровень твердости по сравнению с нелегированной сталью У8 (12,4 ГПа). Аналогичный результат наблюдается для сталей эвтектоидного состава, легированных Si: твердость сталей 80С2 (11,4 ГПа) и 80С4 (11,3 ГПа) заметно ниже, чем у деформированной трением закаленной стали У8 (12,4 ГПа). При этом дополнительное легирование Si (1,66-4,20 мас. %) или Ni (2,90 мас. %) снижает не только прочность, но и сопротивление термическому разупрочнению НКС углеродистых сталей при нагреве до 100-350°С. Снижение микротвердости и теплостойкости НКС углеродистых сталей при легировании Si и Ni обусловлено отрицательным влиянием элементов замещения на эффективность блокировки дислокаций атомами углерода [1], а также повышенной хрупкостью поверхностей трения кремнистых сталей. Наличие в сталях 20ХН3А, 40Х и 20ХН3А (цементованной) 0,68-1,06 мас. % Cr обеспечивает менее интенсивное снижение микротвердости при температурах отпуска выше 400°С как исходного закаленного, так и дополнительно упрочненного трением состояний по сравнению со сталями 20, 40 и У8. Это, по-видимому, обусловлено тормозящим влиянием Cr на процессы возврата в α-фазе и роста частиц цементита при нагреве сталей. У кремнийсодержащих сталей (как в закаленном, так и в деформированном состояниях) при повышении температуры отпуска более 200°С наблюдается сильное замедление разупрочнения, обусловленное влиянием Si на процессы распада мартенсита, возврата и рекристаллизации α-фазы, устойчивость ε-карбида и скорость коагуляции цементита. После отпуска при температурах 400-600°С у подвергнутых фрикционной обработке сталей 80С2 и 80С4 отмечается повышенная твердость по сравнению с деформированной сталью У8; с ростом содержания Si указанное преимущество в твердости возрастает.

Таким образом, дополнительное легирование Ni (2,90 мас. %) или Si (1,66-4,20 мас. %) снижает сопротивление термическому разупрочнению НКС трения высокоуглеродистых сталей при нагреве до 100-350°С. Однако введение Si (1,66-4,20 мас. %) и Cr (0,68-1,06 мас. %) в стали повышает теплостойкость сформированных фрикционной обработкой НКС при температурах нагрева 400-600°С.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-9-12-45).

Литература

1. Гаврилюк В.Т. Распределение углерода в стали. Киев: Наукова думка, 1987. 208 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Спевак Л.Ф.[1], Нефедова О.А.[1], Макаров А.В.[1,2], Самойлова Г.В.[2]

[1]*ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация,*
e-mail: lfs@imach.uran.ru, nefedova@imach.uran.ru

[2]*ИФМ УрО РАН, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, Российская Федерация,*
e-mail: avm@imp.uran.ru, a1isova@mail.ru

В работе исследовано влияние предварительной фрикционной обработки на модифицирование поверхностного слоя аустенитной нержавеющей стали, подвергаемой далее низкотемпературному ионному азотированию в плазме электронного пучка [1]. В условиях фрикционно-силового нагружения на поверхности образца возникают остаточные сжимающие напряжения, приводящие к изменению напряженного состояния в градиентном поверхностном слое. Построены две математические модели процесса ионного азотирования, учитывающие влияние остаточных напряжений $\hat{\sigma}$. Одна из предложенных моделей построена в предположении зависимости коэффициента диффузии от концентрации азота [2, 3]. Уравнение диффузии для полуограниченного образца в этом случае имеет вид:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D(c)\frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \right) - \frac{V_N}{RT}\frac{\partial}{\partial x}\left(D(c)c(x,t)\frac{\partial \hat{\sigma}(x,t)}{\partial x} \right)$$

при заданных начальных и граничных условиях.

Другая модель учитывает также влияние внутренних сжимающих напряжения σ, возникающие в поверхностном слое во время процесса азотирования [2 – 4]. В этом случае уравнение диффузии для одномерного диффузионного процесса имеет вид:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} - \frac{DV_N}{RT}\frac{\partial c(x,t)}{\partial x}\left(\frac{\partial \hat{\sigma}(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma(x,t)}{\partial x} \right).$$

Для разработанных моделей предложены алгоритмы решения краевых задач на основе метода граничных элементов. Работа алгоритмов продемонстрирована на модельных примерах.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 15-08-07947.

Литература

1. Гаврилов Н.В., Меньшаков А.И. Низкотемпературное азотирование нержавеющей стали в плазме электронного пучка при 400ºС // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – №5. – С. 31–36.

2. Spevak L.F., Nefedova O.A., Makarov A.V., Samoilova G.V. Mathematical Modelling of Plasma Nitriding of Austenitic Stainless Steel [Electronic resource] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 6. – P. 68–79. – DOI: 10.17804/2410–9908.2015.6.068–079.

3. Moskalioviene T., Galdikas A. Stress induced and concentration dependent diffusion of nitrogen in plasma nitrided austenitic stainless steel // Vacuum. – 2012. – Vol. 86. – Iss. 10. – P. 1552–1557.– DOI: 10.1016/j.vacuum.2012.03.026

4. Galdikas A., Moskalioviene T. Modeling of stress induced nitrogen diffusion in nitrided stainless steel // Surface & Coatings Technology – 2011. – Vol. 205. – Iss. 12. – P. 3742–3746. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.01.040.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИЙ РЯДА МЕТОДОВ ПОДПРОСТРАНСТВ КРЫЛОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ГЕТЕРОГЕННЫХ КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Халевицкий Ю.В., Бурмашева Н.В., Коновалов А.В., Партин А.С.

Институт машиноведения УрО РАН, д.34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620042, Российская Федерация, e-mail: me@dijkstra.ru

Моделирование больших упругопластических деформаций методом конечных элементов необходимо для разработки научно обоснованных режимов изготовления элементов конструкций методами обработки металлов давлением. Наибольшая вычислительная сложность при моделировании данных процессов на ЭВМ приходится на решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с большими разреженными матрицами.

Использование прямых методов решения СЛАУ, таких как метод Гаусса, не позволяет решать задачи на мелкой конечно-элементной сетке за приемлимое время. Для решения таких задач необходимо использовать итерационные методы, основанные на подпространствах Крылова и современные вычислительные системы.

На данный момент единственным способом, позволяющим выбрать наиболее подходящий к физике конкретной задачи итерационный метод и предобуславливатель является вычислительный эксперимент [1]. В ходе работы была исследована производительность четырёх итерационных методов с предобуславливателем Якоби на гетерогенной кластерной системе «Уран» ИММ УрО РАН, оснащённой ускорителями Nvidia Tesla M2090. Реализации методов были взяты из библиотеки PETSc и используют OpenCL. Матрица исследуемой СЛАУ была получена из модельной задачи сжатия упругопластического параллелепипеда, разбитого на 903 гексаэдральных восьмиузловых конечных элементов. Время решения СЛАУ с данной матрицей представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Время решения СЛАУ, с

	Количество ускорителей			
	2	4	6	8
BiCGStab [2]	111	49	69	62
FGMRES [3]	125	125	148	169
CGS[4]	38	36	41	44
TFQMR[5]	36	34	40	43

Видно, что наилучшую производительность показывают методы TFQMR и CGS. Данная реализация позволяет эффективно использовать только 2 ускорителя.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН, проект №15-7-1-17, в части применения исследуемых алгоритмов для моделирования деформаций упруговязкопластических тел.

Литература

1. N. M. Nachtigal, S. C. Reddy, and L. N. Trefethen, SIAM J. Matrix Anal. Appl. 13, 778–795 (1992), http://dx.doi.org/10.1137/0613049

2. H. A. van der Vorst, SIAM J. Sci. Stat. Comput. 13, 631–644 (1992), http://dx.doi.org/10.1137/0913035

3. Y. Saad and M. Schultz, SIAM J. Sci. Stat. Comput. 7, 856–869 (1986), http://dx.doi.org/10.1137/0907058

4. P. Sonneveld, SIAM J. Sci. Stat. Comput. 10, 36–52 (1989), http://dx.doi.org/10.1137/0910004

5. R. W. Freund, SIAM J. Sci. Stat. Comput. 14, 470–482 (1993), http://dx.doi.org/10.1137/0914029

ПОДХОД К ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СБОРКЕ МАТРИЦЫ ЖЁСТКОСТИ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ

Халевицкий Ю.В., Бурмашева Н.В., Коновалов А.В.

Институт машиноведения УрО РАН, д.34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620042, Российская Федерация, e-mail: me@dijkstra.ru

Компьютерное моделирование поведения деформируемых тел методом конечных элементов требует решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Матрицы систем являются разреженными и имеют большую размерность. Помимо высокой вычислительной сложности решения СЛАУ, значительных ресурсов требует операция создания матрицы системы из матриц жесткости отдельных конечных элементов модели. Такой процесс называется сборкой матрицы жёсткости. Процесс её сборки в упругопластических задачах с большими деформациями и учётом различных граничных условий дополнительно осложняется изменяющимся состоянием конечных элементов, часть из которых может находиться в упругости, а также одновременным применением дополнительных видов элементов, например, контактных пар. В работе описан подход к сборке матрицы жёсткости, при котором её компоненты вычисляются индивидуально и параллельно, а их компоновка производится с помощью специальной структуры данных, управляющей памятью и обеспечивающей синхронизацию потоков.

Структура данных представляет собой массив развёрнутых списков и в наиболее типичном случае позволяет производить сборку матрицы жёсткости за время, пропорциональное количеству узлов в конечно-элементной сетке. Для обеспечения возможности параллельной работы вычислителей доступ к группам строк матрицы контролируется мьютексами.

Для практической проверки эффективности алгоритма были проведены вычислительные эксперименты на суперкомпьютере «Уран» ИММ УрО РАН. Исследовалась зависимость времени работы алгоритма от количества узлов конечно-элементной сетки n_{dof}, а также масштабируемость алгоритма с ростом количества ядер на примере сборки матрицы СЛАУ в задаче осадки упругопластического параллелепипеда двумя жесткими плитами с учетом прилипания в области контакта. Время работы вычислителей в ходе выполнения сборки приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Время работы вычислителей, с

n_{dof}	Количество вычислителей					
	1	2	4	6	8	12
1030301	41	21	11	8	6	4
2000376	80	40	21	17	12	7
3048625	123	62	33	25	17	11
4019679	162	81	43	33	22	15
5000211	207	107	53	41	29	19
6028568	251	130	67	51	39	27

Результаты экспериментов показывают линейный рост времени работы алгоритма с увеличением количества узлов конечно-элементной сетки. Использование 12 вычислителей позволяет добиться десятикратного уменьшения времени расчётов.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН (проект №15-7-1-17) в части применения разработанного алгоритма для моделирования деформаций упруговязкопластических тел.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ошмарин Д.А., Сероваев Г.С., Шестаков А.П.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, д.1, ул. Королёва, г. Пермь, 614013, Российская Федерация, e-mail: serovaev@icmm.ru

Композитные материалы имеют широкое применение в производстве современных конструкций различного назначения благодаря их высоким прочностным и низким весовым характеристикам. Для этих материалов характерны определенные виды дефектов, появляющиеся как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации. Самыми распространенными среди них являются: разрыв нитей армирования, пустоты в связующем и расслоение. Такие дефекты вызывают концентрацию напряжений и как следствие снижают прочность композиционного материала. Появление дефекта в процессе эксплуатации свидетельствует о переходе конструкции в предаварийное состояние. Для обеспечения ее безопасной эксплуатации следует осуществлять мониторинг процесса появления и развития дефектов с целью своевременного выполнения ремонтных мероприятий. Как правило, мониторинг осуществляется на основе методов неразрушающего контроля, одним из которых является вибрационный подход. Количественной оценке его параметров, применительно к композиционным пластинам, посвящена настоящая работа. К этим параметрам относятся: диапазон частот, в котором дефект оказывает наиболее сильное искажение динамических сигналов; шаг пространственной сетки сенсоров и актуаторов для надежной регистрации дефекта заданной формы и размера; мощность актуаторов и чувствительность сенсоров обеспечивающих выбранный шаг сетки. Выбор этих параметров осуществлен на основе численного моделирования. Механические упругие и диссипативные свойства композиционного материала определены в результате натурных испытаний образца на установке DMA 242C. При моделировании рассматривалось три типа анализа: спектральный, гармонический и исследование волновых процессов. В результате спектрального анализа определены собственные формы и частоты, наиболее сильно изменяющиеся при появлении и развитии дефекта. Алгоритм их определения подробно изложен в статье [1]. Эти частоты могут быть использованы в качестве индикатора дефекта. Гармонический анализ заключался в периодическом силовом возбуждении пластины в локальной области на ее поверхности, точка регистрации располагается на некотором фиксированном расстоянии от места возбуждения. Между точкой возбуждения и регистрации на равных расстояниях располагается дефект. Анализ заключается в сравнении измеренных сигналов в случае с дефектом и без, для диапазона частот, включающего наиболее чувствительные собственные частоты, полученные из спектральной задачи. Исследование волновых процессов выполнялось аналогично гармоническому анализу, за исключением того, что вместо периодически изменяющейся силы прикладывалось локализованное по времени силовое нагружение с доминирующей частотой, определенной из модального анализа. Проведенные численные эксперименты позволили оценить связь между размером дефекта, мощностью актуатора, чувствительностью сенсора и необходимым шагом сетки их расположения.

Перспективными, с точки зрения практической реализации системы мониторинга, являются материалы с пьезоэлектрическими свойствами, поскольку они могут быть использованы как актуаторы и сенсоры. Для датчиков, выполненных на основе этих материалов, определено расстояние между местом приложения внешней нагрузки и местом съема сигнала, на котором сенсор способен зафиксировать дефект располагающийся между ними.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-31-00305 мол_а).

Анализ собственных форм и частот колебаний композитной пластины с дефектом выполнен за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 14-29-00172).

Литература

1. Быков А.А., Матвеенко В.П., Сероваев Г.С., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Математическое моделирование вибрационных процессов в железобетонных конструкциях для организации мониторинга появления трещин // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 2. С. 60-72.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСЕ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА

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

ФГБОУ ВПО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, д. 7, ул. Студенческая, г. Ижевск, 426069 Российская Федерация, e-mail: ludmila396@rambler.ru

Измерения механических (остаточных и термических) напряжений неразрушающими методами являются важной проблемой для российских железных дорог. Трещинообразование в некоторых рельсах связано с высокими остаточными напряжениями, создаваемыми в процессе производства рельсов на выпрямительных роликовых стендах, применяемых на конечной стадии производства после закалки и отпуска. Формируются остаточные напряжения в рельсе при термической обработке и правке, термические – при эксплуатации в результате жесткого закрепления на железобетонных шпалах.

В данном исследовании проведена оценка напряжений в элементах рельса ультразвуковым методом с использованием структуроскопа электромагнитно-акустического СЭМА (госреестр Госстандарта № 61957-15), разработанного в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова. В основе метода лежит эффект акустоупругости, описываемый зависимостью скорости распространения ультразвуковых волн от механических напряжений, связанных через акустоупругие коэффициенты. Скорости распространения волн определяют по результатам измерений времени пробега импульсов сдвиговых волн, поляризованных в ортогональных направлениях относительно оси рельса эхо-импульсным методом. Ввод и прием сдвиговых волн осуществляется бесконтактным ЭМА преобразователем.

При размещении преобразователя на поверхности катания ультразвуковой луч встречает на своем пути разнознаковые области напряжений в головке, шейке и подошве, возникающие в процессе изготовления, поэтому суммарные напряжения не дают точного представления о реальных напряжениях в отдельных элементах рельса.

С целью определения локальных напряжений в элементах рельса произведены раздельные измерения в головке, шейке и подошве при вводе ультразвуковых волн с поверхности катания, с торцевой поверхности отрезка рельса и в отдельном фрагменте головки рельса. Установлено, что при измерении напряжений по высоте рельса со стороны поверхности катания наблюдаются небольшие растягивающие напряжения, а во фрагменте вырезанной головки значительные сжимающие напряжения. При измерении напряжений с боковой поверхности шейки выявлены высокие растягивающие напряжения.

Исследования с торцевой поверхности в продольном направлении головки, шейки и подошвы, показали, что в шейке также наблюдаются растягивающие напряжения, а в подошве и головке – сжимающие, что объясняется технологией термической обработки.

Процесс эксплуатации также вносит вклад в распределение напряжений по всем элементам рельса.

Таким образом, установлено, что в каждом из элементов рельсов (головке, шейке, подошве) внутренние напряжения индивидуальны и зависят от технологии изготовления и наработки рельса.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №15-12-0000).

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В РЕЖИМЕ СТРУКТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Швейкин А.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, пр. Комсомольский, г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: elvira16_90@mail.ru

Известно, что деформирование в режиме структурной сверхпластичности (ССП), которое выгодно в технологических процессах термомеханической обработки с точки зрения энергозатрат, может реализовываться для многих поликристаллических металлов и сплавов – при определенных внешних условиях (температуре и скорости деформирования) и определенном состоянии зеренной структуры материала. Лидирующим механизмом ССП является зернограничное скольжение, которое реализуется во взаимодействии с внутризеренным дислокационным скольжением, диффузионными и ротационными процессами. Для комплексного описания деформирования поликристаллических металлов (в режиме ССП, в режиме «обычной» неупругости, переходов между ними) предлагается использование многоуровневых моделей, основанных на введении внутренних переменных и физических теориях пластичности [1,2], позволяющих явно описывать эволюцию внутренней структуры и различные физические механизмы деформирования.

В качестве базовой предлагается использовать разработанную ранее двухуровневую конститутивную статистическую модель (два масштабных уровня – макро- и мезоуровень) неупругого деформирования поликристаллических материалов [1,2]. Предлагаемая модель является промежуточной между статистической и прямой моделями – учитывает размеры, форму, взаиморасположение кристаллитов и границ, а также их изменение в процессе деформирования. На мезоуровне вводятся описания двух структурных элементов поликристалла – кристаллитов и их границ. Модель включает описания внутризеренного дислокационного и зернограничного скольжения: скорости внутризеренных и зернограничных сдвигов определяются с помощью соотношений аррениусовского типа; в уравнениях для зернограничных сдвигов учитываются изменение структуры границы, приток в границу решеточных дислокаций, протекание диффузионных процессов [3]. Модель поворота решетки кристаллитов учитывает несовместность скольжения дислокаций в соседних кристаллитах [2], при этом вводятся силовые моментные факторы, которые совместно с напряжениями используются при описании процессов фрагментации и дробления кристаллитов, предложенные модельные описания этих процессов позволяют отслеживать эволюцию зеренной структуры, в частности – подготовку материала к реализации структурной сверхпластичности.

Разработан алгоритм реализации многоуровневой модели, проведены численные эксперименты для различных нагружений представительных объемов поликристаллических металлов. Получены результаты, в том числе – характеристики изменяющейся внутренней структуры, для различных режимов деформирования, а также при переходах между ними.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, № гос. регистр. 01201460535), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 14-01-00069-а, 15-08-06866-а).

Литература

1. П.В. Трусов, В.Н. Ашихмин, П.С. Волегов, А.И. Швейкин. Определяющие соотношения и их применение для описания эволюции микроструктуры. Физическая мезомеханика. 2009, № 12, 3, с. 61–71.

2. П.В. Трусов, А.И. Швейкин, Е.С. Нечаева, П.С. Волегов. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры. Физическая мезомеханика. 2012, № 15, 1, с. 33–56.

3. P.V. Trusov, A.I. Shveykin, E.R. Sharifullina, N.S. Kondratev. Model of polycrystalline inelastic deformation with grain boundary sliding description. Advanced Materials Research. 2014, Vol. 1040, pp.86–91.

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА И АУСТЕНИТНОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ

Пугачева Н.Б. [1], Мичуров Н.С. [1], Смирнова Е.О. [1], Веретенникова И.А. [1], Сенаева Е.И. [2]

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, e-mail: n.michurov@gmail.com*
[2]*ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия.*

Сварка разнородных материалов, таких как титановые сплавы и коррозионностойкие аустенитные стали сопряжена с проблемой появления трещин в зонах термического влияния из-за существенных различий их теплофизических свойств. В настоящее время имеется определенный опыт использования промежуточных пластин для получения плавного перехода между свариваемыми материалами при их расплавлении и снижения вероятности трещинообразования. Целью данного исследования является сравнение усталостной прочности лазерных сварных соединений сплава ВТ1-0, стали 12Х18Н10Т и разнородных материалов с промежуточной медной пластиной.

Исследованы лазерные сварные швы листов толщиной 3 мм, полученные в ИТПМ СО РАН. Исследование микроструктуры проводили методами оптической металлографии и растровой электронной микроскопии (TESCAN VEGAII XMU с волнодисперсионной и энегродисперсионной приставками фирмы OXFORD). Микротвердость всех зон сварных соединений по высоте и шири не швов на приборе LEICA при нагрузке 50 г. Усталостные испытания проводили на сервогидравлической испытательной машине INSTRON 8801[1] по синусоидальному циклу с частотой нагружения 5 Гц при коэффициенте асимметрии цикла R = 0. Было определено количество циклов до разрушения при различных уровнях приложенной нагрузки. Рельеф поверхности разрушения исследовали на растровом электронном микроскопе TESCAN с использованием терминов и определений РД 50-672-88.

Отличительной особенностью сварных швов разнородных материалов с промежуточной медной пластиной является образование пересыщенного твердого раствора легирующих элементов в кристаллической решетке меди с равномерным распределением дисперсных частиц интерметаллидов $Ti(Fe,Cr)_2$ и $TiCu_3$. На границе с титановым сплавом хорошо видна диффузионная зона, состоящая из твердого раствора Fe, Cu, Cr и Ni в кристаллической решетке титана. На границе со сталью диффузионная зона представляет собой твердый раствор Cu, Ti, Cr и Ni в кристаллической решетке. Количество циклов до разрушения (N) испытанных образцов приведены в табл. Для образцов сплава ВТ1-0 характерно разрушение по механизму вязкого разрушения с участками ямочного излома. Для образцов стали 12Х18Н10Т характерно разрушение по механизму вязкого излома с ямками различной глубины содержит и отдельными фрагменты сотового рельефа. Образцы с промежуточной медной пластиной разрушились по диффузионной зоне, образовавшейся на границе с титановым сплавом. Причем поверхность разрушения соответствует хрупкому разрушению, что обусловлено формированием пересыщенного твердого раствора Fe, Cr, Cu в Ti. Значения микротвердости этой диффузионной зоны достигали 800 HV 0,05.

Таблица – Количество циклов до разрушения образцов с лазерными сварными швами

$№_{обр}$	Режим сварки	σ_{max}, МПа	N
1	ВТ1-0 – ВТ1-0	433	5770
2	12Х18Н10Т – 12Х18Н10Т	549	4920
3	12Х18Н10Т – Cu – ВТ1-0	474	5230

Работа выполнена по государственному заданию ФАНО тема № 01201375907 и частичной поддержке гранта РФФИ 16-38-00741 мол_а.

[1] Все испытания проведены на оборудовании Центра коллективного пользования ИМАШ УрО РАН.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 09Г2С

Почивалов Ю.И.[1], Смирнова А.С.[1,2], Панин В.Е.[1,2]

[1]*ИФПМ СО РАН, д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 643055, Российская Федерация,*
e-mail: pochiv@ispms.tsc.ru
[2]*НИТПУ, д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация*

Научно-техническая проблема увеличения эксплуатационных ресурсов высоконагруженных потенциально опасных объектов, таких как магистральные газо- и нефтепроводы, мосты, элементы конструкций, применяемые в авиационной, космической сфере и кораблестроении и т.д., является одной из важнейших на сегодняшний день. Для решения этой проблемы разрабатываются новые высокопрочные стали и высокоэффективные методы их термомеханической обработки. В настоящей работе предложен новый способ термомеханической обработки малоуглеродистых низколегированных сталей с использованием ультразвуковой механической ковки. Использование последней позволило получить в поверхностном слое стали наноструктуру с высокими механическими свойствами. При такой термомеханической обработке были достигнуты очень высокие значения прочности стали в сочетании с хорошей пластичностью и высокие значений усталостной прочности и долговечности исследуемого материала.

В качестве объектов исследования была выбрана малоуглеродистая низколегированная сталь 09Г2С. Сталь 09Г2С исследовали в трех структурных состояниях: после нормализации при 1203 К (10 минут) и двух термомеханических обработок (ТМО1 и ТМО2). Металлографические исследования выполнены на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axiavert 25 CA, рентгеноструктурный анализ на автоматическом дифрактометре ДРОН 3М в CuK_a-излучении. Механические испытания на активное растяжение проводили на универсальной испытательной машине «Instron-5582», испытания на малоцикловую усталость выполнены на гидравлической испытательной машине «Schenck Sinus.100.40».

Микроструктура стали в нормализованном состоянии представляет собой двухфазную феррито-перлитную структуру с параметром решетки 0,2868 нм и размером зерна 8–30 мкм. После термомеханической обработок формируется феррито-мартенситная структура с образованием новых зерен феррита по границам старых зерен. Средний размер зерна в такой структуре 20-50 мкм. Параметр решетки исследуемой стали после ТМО1 уменьшается по сравнению с нормализованным состоянием, а после ТМО2 увеличивается.

Механические испытания на активное растяжение образцов стали 09Г2С, подвергнутой нормализации и последующей ультразвуковой обработке позволили оценить влияние наноструктурированного поверхностного слоя на характер развития деформации в данной стали. Из экспериментальных данных следует, что формирование наностуктурированного поверхностного слоя приводит к значительному увеличению предела упругости и текучести при небольшом снижении прочности и пластичности. Соответственно это обеспечивает высокое соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_в$, которое определяет ресурс работы конструкционных материалов в процессе эксплуатации. После термомеханических обработок прочностные свойства стали 09Г2С резко возрастают с 736 МПа до 1003,82 МПа при снижении пластичности почти в 2 раза. При этом наибольшее соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_в$ достигается после термомеханической обработки по режиму 2 (ТМО2), поэтому этот режим обработки должен быть наиболее эффективен для повышения усталостных характеристик исследуемой стали.

Проведенные усталостные испытания подтвердили это предположение. После ТМО2 при приложенном напряжении 600 МПа усталостная долговечность стали 09Г2С возрастает в 3,4 раза относительно ТМО1. Сравнение полученных в работе данных по усталостным испытаниям для исследуемой стали, с имеющимися в литературе для нормализованного состояния, показывает, что предлагаемые режимы термомеханической обработки позволяют повысить усталостную прочность с 250-300 МПа до 600 МПа.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ И БЕТОНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Гусев Г.Н., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.

ИМСС УрО РАН, д. 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614014, Российская Федерация
e-mail: gusev.g@icmm.ru, shardakov@icmm.ru, shap@icmm.ru

Эксплуатационный ресурс железобетонных конструкций во многом определяется параметрами, характеризующими появление необратимых деформаций. Сложность эволюции деформационных процессов в железобетонных конструкциях от начального консервативного состояния к конечному - критическому обусловлена особенностями деформационных свойств бетона и стальной арматуры, а также их конструкционным взаимодействием. Построение численных моделей, достоверно описывающих процессы трещинообразования и развития трещин в железобетоне, позволяет оценивать несущую способность и ресурс прочности того или иного конструктивного элемента без привлечения дорогостоящих натурных экспериментов. Установлено, что в эволюции процесса трещинообразования в железобетонных конструкциях доминирующую роль играет механизм разрушения связей между арматурой и бетоном.

В настоящей работе представлена конечно-элементная модель процесса образования трещин в зоне взаимодействия стальной арматуры и бетона. Математическое моделирование деформационного процесса, включающего этап трещинообразования, осуществлено в рамках феноменологических подходов механики деформированного твердого тела. В использованном подходе процесс трещинообразования моделировался как резкое снижение жесткости материала (бетона) в локализованной области. Направление распространения локализованной области с пониженной жесткостью, место расположения этой области, а также закономерности снижения жесткостных характеристик материала определялись на основе критериальных тензорных соотношений. Расчетная область в модели представляет собой осесимметричный элемент бетонной конструкции с одним арматурным стержнем внутри. Тело арматурного стержня в модели максимально детализировано. Моделируется процесс выдергивания стержня из тела бетона. Анализируются сопутствующие этому процессу явления в построенной модели. Проведено сравнение результатов квазистатического расчета и решения, учитывающего силы инерции. В качестве обоснования целесообразности учета сил инерции приводится оценка вклада кинетической энергии в момент трещинообразования в общую механическую энергию системы. Представлены численные расчеты с использованием различных физико-механических характеристик тел бетона и арматуры. Построены зависимости нормальных и касательных напряжений в стержне в зоне контакта с телом бетона по его длине на разных шагах приложения нагрузки. Построены картины образования и эволюции трещин.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №14-29-00172.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА 01570С В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЕФОРМАЦИЙ

Коновалов А.В., Смирнов А.С.*, Муйземнек О.Ю., Белозеров Г.А.

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

Сплавы типа Al–Mg–Sc–Zr относятся к высокопрочным алюминиевым сплавам, предназначенным для увеличения удельной прочности элементов конструкций, к которым предъявляются требования по высокой коррозионной стойкости и малому весу. Алюминиевый сплав 01570С разработан на основе сплава АМг6 путем легирования Sc и Zr. Это повысило прочностные характеристики сплава с сохранением хороших коррозионностойких свойств, благодаря чему в аэрокосмической индустрии всё чаще начинают использовать в качестве конструкционного сплав 01570С взамен сплава АМг6. Заготовки из сплава 01570С подвергают обработке давлением в условиях высоких температур с целью придания конструкции требуемой формы и свойств. Для разработки технологических параметров обработки заготовок целесообразно использовать компьютерное моделирование, которое позволяет определить энергосиловые параметры деформации, накопленную поврежденность заготовки, формирование микроструктуры и другие контролируемые характеристики заготовки. Для этого необходимо, чтобы модель материала адекватно описывала его реологическое поведение в условиях высоких температур, на которое оказывает влияние взаимодействие процессов упрочнения и разупрочнения сплава в процессе пластической деформации. С механической точки зрения реологию материала характеризует сопротивление деформации.

Цель данной работы исследовать возможность применения ранее разработанной математической модели сопротивления деформации для описания реологического поведения сплава 01570С при температуре 300 °С.

Прокатанный на металлургическом заводе лист толщиной 30 мм из сплава 01570С был предварительно нарезан на прутки вдоль направления прокатки. Затем из этих прутков были выточены цилиндрические образцы диаметром 6 мм и высотой 9 мм. Изготовленные образцы были подвергнуты гомогенизационному отжигу в вакууме при температуре 350 °С в течение 15 часов. Сопротивление деформации образцов определяли в экспериментах на сжатие образцов на величину 50 % при температуре. Скорость деформации образцов в процессе испытания изменялась по трем законам деформации в диапазонах 0,1 - 0,25 $с^{-1}$; 0,55 – 1,55 $с^{-1}$ и 0,9 – 5,5 $с^{-1}$ соответственно.

Как показали исследования, в сплаве 01570С при деформации в условиях высоких температур активно происходит блокирование движения свободных дисклокаций дисперсоидами, приводящее к упрочнению материала, и идет рекристаллизация *in situ*, приводящая к разупрочнению сплава.

За основу взяли структуру модели, ранее разработанную и опробованную на сплаве АМг6, которая учитывает упрочнение за счет приращения плотности дислокаций и барьерного эффекта посредством блокирования движения свободных дислокаций, разупрочнение в результате динамического возврата и динамической рекристаллизации.

На основании полученных экспериментальных кривых сопротивления деформации выполнили идентификацию и верификацию модели. Верификация модели провели по экспериментальным данным, не использованным в процедуре идентификации. По результатам верификации можно сделать вывод, что ранее разработанная модель с приемлемой для инженерных расчетов точностью описывает реологическое поведение сплава 01570С при температуре 300 °С.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-08-00160 в части исследования реологического поведения сплава 01570С.

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И РЕМОНТ ПОВРЕЖДЕННОГО ТРУБОПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Недин Р.Д.

Южный федеральный университет, д. 8а, ул. Мильчакова, г. Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация, e-mail: rdn90@bk.ru

Проблемы безопасности и надежности магистральных трубопроводов являются критически важными, особенно в нефтегазовой сфере. Такие трубопроводы часто изнашиваются по причине воздействий различного характера, в результате чего образуются разнообразные дефекты, включая дефекты сварных соединений, трещины, коррозию и эрозию. Существующие на сегодняшний день методы ремонта магистральных трубопроводов часто основаны на сварки, что подразумевает остановку транспортировки продукта и влечет за собой существенные финансовые затраты; одним из возможных способов сокращения затрат является разработка альтернативной технологии ремонта трубопроводов в процессе их эксплуатации. Таким образом, задачи корректного механического моделирования магистральных трубопроводов под давлением и разработки технологии их ремонта во время эксплуатации являются весьма важными и актуальными.

В настоящей работе рассмотрено две задачи для поврежденного фрагмента трубопровода, находящегося под внутренним давлением. В постановке первой задачи считается, что на поверхности трубы присутствовали два дефекта потери металла, образованные в результате коррозионного/эрозионного воздействия, которые впоследствии были технологически обработаны: в зоне каждого дефекта был вырезан скругленный прямоугольный «карман» с целью удаления корродированного материала. В рамках поставленной задачи построена конечноэлементная модель рассмотренного фрагмента поврежденного трубопровода в двух пакетах: ANSYS и Siemens NX. Разработанная конечноэлементная модель является обобщенной и зависит параметрически от входных данных всех параметров задачи, включая геометрию и материал трубы, рабочее давление, форму и расположение дефектов. В качестве тестовых образцов были использованы фрагменты труб, выполненных из стали марки X52, с различной геометрией и параметрами дефектов. Для каждого из рассмотренных случаев рассчитано неоднородное распределение напряжений и деформаций в зонах дефектов, а также выявлены наиболее опасные зоны с точки зрения анализа концентраторов напряжений. Сравнительный анализ решений, полученных в двух конечноэлементных пакетах, продемонстрировал их достаточную близость. Проведенная серия вычислительных экспериментов также позволила отобрать геометрические параметры и относительные положения дефектов, для которых максимальный уровень достигаемых напряжений превышает допустимый; в этих случаях фрагмент трубопровода нуждается в замене. В то же время был выявлен диапазон допустимых параметров дефектов, для которых не требуется проводить замену трубопровода при его ремонте; в связи с этим поставлена нижеследующая вторая задача о развитии альтернативного подхода к ремонту трубопровода во время его эксплуатации.

Вторая задача рассмотрена для вышеописанной трубы с двумя обработанными поверхностными дефектами, которая дополнительно упрочнена за счет натягивания оболочки, выполненной из многослойного композиционного материала (в котором слои композита разделены слоями адгезива), на фрагмент поверхности трубы, содержащий дефекты. При этом полости «карманов» обработанных дефектов под слоем оболочки предварительно залиты специальным полимерным наполнителем. В рамках поставленной задачи проанализировано влияние выбираемых параметров материала и структуры оболочки и наполнителя на распределение напряжений в трубе с целью получения наиболее эффективных и оптимальных свойств композитной оболочки и наполнителя, которые в будущем позволят проводить ремонт трубопроводов с дефектами во время их эксплуатации. Таким образом, предлагаемые подходы при их реализации приведут к снижению стоимости ремонта поврежденных магистральных трубопроводов.

Работа выполнена при поддержке Проекта «INNOPIPES» # 318874 в рамках Европейской Программы FP7-PEOPLE-2012-IRSES, РФФИ (№ 16-01-00354, № 16-38-60157 мол_а_дк), Гранта Президента Российской Федерации МК-5440.2016.1 .

О МОДЕЛИРОВАНИИ И МЕТОДАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СТЕРЖНЕ

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

Южный федеральный университет, д. 8а, ул. Мильчакова, г. Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация, e-mail: vatulyan@math.rsu.ru, dudarev_vv@mail.ru, rdn90@bk.ru

Разработаны теоретические модели установившихся колебаний стержней при наличии неоднородных полей предварительных напряжений и деформаций (ПНД) в рамках теорий Эйлера-Бернулли и Тимошенко. Продемонстрировано, что вывод корректных постановок задач для тел с ПНД может быть осуществлен как на основе классического вариационного принципа Лагранжа, так и на основе общей слабой постановки для упругого тела. В качестве модели ПНД использована общая модель Треффтца-Гузя динамического поведения упругого преднапряженного тела.

На основе разработанных моделей, рассмотрены задачи о совместных продольно-изгибных колебаниях предварительно напряженно-деформированных изотропных стержней. Все характеристики стержня, включая материальные константы и факторы ПНД, заданы в виде неоднородных зависимостей. В рамках балочной модели Тимошенко учитывались как компоненты тензора предварительных напряжений, так и остаточные деформации в виде предварительного прогиба и начального угла поворота главной оси стержня, обусловленный изгибом.

Решение поставленных краевых задач об определении функции смещения при заданном уровне и законе распределения ПНД реализовано численно с помощью методов пристрелки и конечных элементов. Построены зависимости амплитудно-частотных характеристик от типа предварительного состояния; в качестве примеров рассмотрены поля ПНД, образованные в результате пластических деформаций бруса, а также одноосного преднапряжения [1]. Проведен анализ влияния параметров, характеризующих ПНД в стержне, на амплитудно-частотные характеристики. Также для случая одноосных преднапряжений выявлено изменение значений частоты колебаний в зависимости от значений параметра, характеризующего геометрию стержня. На основе анализа свободных колебаний получена формула для определения резонансных значений частоты по данным об уровне и законе изменения преднапряжения. Апробация формулы проведена на примере численных расчетов для различных значений параметров задачи.

Сформулированы две обратные задачи о неразрушающей реконструкции неоднородных одноосных преднапряжений в стержне по двум различных наборам данных: 1) о функции смещения в конечном числе точек при заданной частоте, 2) о функции смещения в одной точке для конечного набора частот. Решение первой обратной задачи сведено к построению итерационного процесса, на каждом шаге которого решается интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода с помощью метода регуляризации Тихонова. Решение второй обратной задачи сведено к формуле, включающую численное вычисление интегралов и производных от функции смещения. Представлено несколько примеров реконструкции для различных законов изменения преднапряжения и частот колебаний. Выявлены основные особенности реализации реконструкции преднапряжения в рамках предложенных подходов.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований по стратегическим направлениям развития науки Президиума РАН №1 «Фундаментальные проблемы математического моделирования» (114072870112) «Математическое моделирование неоднородных и многофазных структур», Южного математического института (г. Владикавказ), Гранта Президента Российской Федерации МК-5440.2016.1, РФФИ (№ 16-01-00354, № 16-38-60157 мол_а_дк)

Литература

1. Ватульян А.О., Дударев В.В., Недин Р.Д. Предварительные напряжения: моделирование и идентификация. Ростов-на-Дону, 2014. 206 с.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ СО СЛУЧАЙНОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

Михайлова Н.В., Ташкинов М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д.29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: evlnat@pstu.ru, m.tashkinov@pstu.ru

Важной и актуальной проблемой в механике композитов является изучение процессов деформирования композитов со случайной микроструктурой, разработка моделей механики неоднородных сред, учитывающих особенности реальной структуры композиционных материалов, процессы нелинейного деформирования, появление и развитие областей разрушения в структуре микронеоднородных материалов задолго до полного разрушения конструкций.

Целью данной работы является развитие и реализация подходов стохастических механики применительно к многокомпонентным средам. Для построения моделей деформирования и разрушения композиционных материалов используется структурно-феноменологический подход.

Были рассмотрены частные случаи представительных объемов многокомпонентных композитов со случайным расположением сферических и эллипсоидальных включений. Разработана и реализована методика вычисления значений корреляционных функций полей деформирования в упругопластическом случае при различных условиях нагружения и физико-механических характеристиках компонент композитов. Для получения значений условных (в компонентах) и безусловных (для представительного объема как целого) корреляционных функций полей напряжений и деформаций в представительных объемах и их компонентах использовано решение стохастической упругопластической краевой задачи в полном корреляционном приближении. В качестве входных параметров для вычислений выступают константы, характеризующие свойства компонент представительного объема, и входящие в функции Грина в подынтегральных выражениях, а также геометрические свойства компонент и представительного объема, определяемые структурными моментными функциями.

Построены корреляционные функции напряжений и деформаций для разреженных структур со сферическими и эллипсоидальными полыми включениями. Проведено исследование и выбор аппроксимирующих зависимостей для полученных моментных функций. Полученные численные результаты могут использоваться для предсказания момента начала разрушения микроструктурных компонент материала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-01-96024), а также гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (проект МК-5172.2015.1).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО СТРУКТУРНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ СМЕСИ ПОЛИМЕРОВ

Соколова М.Д., Давыдова М.Л., Дьяконов А.А.

ФГБУН ИПНГ СО РАН, д. 20, ул. Автодорожная, г. Якутск, 677007, Российская Федерация
ФГАОУ ВПО СВФУ им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, д. 58, г. Якутск, 677000, Российская Федерация, e-mail: marsokol@mail.ru, mlar80@mail.ru, afonya71185@mail.ru

Природные цеолиты обладают уникальными свойствами, обусловленными их кристаллохимическими особенностями, высокой адсорбционной и ионообменной способностью, термостойкостью, химической и механической устойчивостью. Они являются яркими представителями наноматериалов, т.к. каркас цеолитов содержит сообщающиеся между собой каналы и полости, образующие пористую структуру с размером пор 0,3–1,0 нм. Поэтому природные цеолиты привлекают внимание исследователей-материаловедов для использования их в качестве наполнителей полимерных материалов.

В представляемой работе природный цеолит Хонгурин Кемпендяйского месторождения (Якутия) применяли в качестве компатибилизатора - специальной добавки, повышающей взаимодействие на границе раздела фаз двух несовместимых полимеров бутадиен-нитрильного каучука (БНКС-18) и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). С целью диспергирования частиц природного цеолита и повышения его структурной активности по отношению к полимерной матрице цеолиты подвергали механической активации в планетарных мельницах «Activator 2S» (ЗАО «Активатор», Россия) и «Пульверизетте 5» (фирма «FRITSCH», Германия). Отличительными особенностями представленных планетарных мельниц являются центростремительное ускорение мелющих тел (у первой - 80g, у второй - 20g) и частота вращения диска (1000 об/мин и 400 об/мин, соответственно). Продолжительность механической обработки природных цеолитов составляет от 1 до 6 мин.

Электронномикроскопические исследования природного цеолита показали, что наибольшая степень диспергирования достигается в планетарной мельнице «Activator 2S» при обработке в течение 2 минут, а в «Пульверизетте-5» в течение 4 минут. При этом наблюдается некоторое разрыхление агломератов и их распад на отдельные частицы.

На дифрактограммах механоактивированных природных цеолитов зарегистрированы характерные для цеолитов максимумы кристаллических пиков, без обнаружения новых структур. Выявлено снижение степени совершенства кристаллической структуры и размера частиц областей когерентного рассеяния (ОКР) цеолитов по мере увеличения продолжительности механической обработки, о чем свидетельствуют уширение и снижение интенсивности дифракционных линий. Наибольшее влияние на дефектность кристаллической структуры и уменьшение размеров ОКР обеих фаз (клиноптилолит, кварц) имеет механическая обработка в планетарной мельнице «Активатор -2S» по сравнению с обработкой в «Пульверизетте-5».

Результаты исследования физико-механических свойств полимерэластомерных композитов на основе БНКС-18 и СВМПЭ показали правомерность проведения предварительной механоактивации природного цеолита. Уровень свойств у полимерэластомерных композитов с механоактивированным природным цеолитом выше, чем при использовании неактивированных. Повышение свойств можно объяснить концентрированием механоактивированных частиц цеолита на границе раздела фаз полимеров. Этот факт установлен методом электронной сканирующей микроскопии с рентгеноспектральным анализом, зарегистрировавший появление пика кремния, основного элемента в составе цеолита на границе раздела полимерных фаз. Повышенная концентрация активных наполнителей обеспечивает более высокий уровень взаимодействия каучука и СВМПЭ и, соответственно, приводит к повышению свойств всего эластомерного материала.

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Сидоров М.М., Голиков Н.И.

ИФТПС СО РАН, д.1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Российская Федерация,
e-mail: sidorovmm@bk.ru

После сварки в сварных соединениях металлоконструкций неизбежным является наличие остаточных сварочных напряжений (ОСН). Общепринятой причиной их возникновения является высокотемпературный нагрев сварки, уменьшение объема при охлаждении сварочной ванны, неоднородность структуры зоны термического влияния. Крайне неблагоприятными являются остаточные растягивающие напряжения. Они облегчают работу образования микротрещин, значительно снижают усталостную прочность и повышают склонность к хрупкому разрушению сварных соединений. Роль их влияния на работоспособность сварных соединений особенно актуальна для конструкций, эксплуатирующихся в условиях холодного климата. Причинами разрушений конструкций, эксплуатируемых в условиях Севера в основном являются хрупкие и усталостные трещины. Как показывает статистика трещины преимущественно берут начало в зоне сварного соединения [1]. В работе рассмотрено влияние остаточных напряжений на усталостную прочность образцов сварных соединений из стали 09Г2С при малоцикловом нагружении.

Для исследований подготовлены сварные пробы из пластин, толщиной 6 мм по ГОСТ 5264-80. Сварные соединения выполнены ручной дуговой сваркой на постоянном токе. Определение ОСН в сварных соединениях, проводили рентгеновским методом с двух сторон пластин. Напряжения измеряли в продольном и поперечном направлении оси шва. Для сравнения часть сварных проб дополнительно подвергали ультразвуковой ударной обработке (УУО). Обработку проводили со стороны облицовочного шва с целью наведения сжимающих остаточных напряжений на обрабатываемую поверхность [2-3]. Циклические испытания образцов, вырезанных из сварного соединения проводились при малоцикловом растяжении до полного разрушения на сервогидравлической машине Instron 8802.

По измерениям ОСН установлено, что после сварки с двух сторон сварного соединения формированы растягивающие остаточные напряжения. Со стороны облицовочного шва среднее значение поперечных напряжений составляет 160 МПа, продольных – 150 МПа; со стороны корневого шва поперечные –130 Мпа, продольные – 130 МПа.

По результатам циклических испытаний получены линии малоцикловой усталости для образцов сварных соединений, подвергнутых УУО и без обработки. В процессе циклических испытаний образцов с УУО появление трещины наблюдалось с необработанной стороны. Установлено, что УУО необходимо проводить с учетом распределений растягивающих остаточных напряжений в сварных соединениях, мощности генератора, толщины изделия и интенсивности.

Литература

1. Голиков Н.И., Аммосов А.П. Прочность сварных соединений резервуаров и трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях Севера: монография. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2012. 232 с.
2. Golikov N.I., Sidorov M.M. Redistribution of residual welding stresses in ultrasound impact treatment of welded joints in pipes // Welding International. 2012. Т. 26. № 10. С.765–768.
3. Golikov N.I., Sidorov M.M. Investigation of the restribution of residual stresses in cyclic loading of welded joints // Welding International. 2014. Т. 28. № 12. С.970–972.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ТРУБ В РАСТРУБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Старостин Н.П., Васильева М.А., Аммосова О.А.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, д. 20, ул. Автодорожная, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, e-mail: nikstar56@mail.ru

Сварка полипропиленовых труб проводится при температурах воздуха не ниже 0 °С, что огранивает проведение ремонтных работ в системах водоснабжения в зимних условиях в регионах холодного климата. В случаях необходимости проведения сварки при других температурах воздуха работы рекомендуется выполнять в укрытиях с обеспечением предварительного подогрева зоны сварки. При сварке в условиях низких температур наружного воздуха предварительный подогрев можно осуществить специальным инструментом для подогрева с температурой из допустимого для сварки интервала. В работе принято допущение, что обеспечение в процессе охлаждения сварного соединения более однородного распределения температуры по сравнению с распределением температуры при стандартной сварке способствует снижению температурных напряжений. Тогда задача снижения остаточных напряжений в сварном соединении сводится к задаче получения распределения температуры близкого к однородному на стадии формирования сварного шва. Данная работа посвящена исследование динамики температурного поля при сварке полипропиленовых труб в раструб при низких температурах и определение способов достижения распределения температуры с меньшей неоднородностью на стадии кристаллизации материала сварного шва.

При температурах воздуха ниже допустимых для сварки можно осуществить предварительный неравномерный (градиентный) подогрев конца свариваемой трубы и муфты, реализующий достижение на свариваемых поверхностях температуры из допустимого для сварки интервала. Для получения градиентного распределения температуры при предварительном подогреве свариваемых труб и муфты при низких температурах используются сменные насадки (гильза и дорн), в которых поддерживается постоянная температура. Предварительный градиентный подогрев трубы осуществляется с внутренней, а муфты – с внешней поверхности. Предложена математическая модель теплового процесса при предварительном градиентном подогреве и сварке, которая учитывает теплофизические характеристики материала труб, геометрические размеры, температуру окружающего воздуха, технологические параметры. На этапе нагрева (оплавления) и охлаждения (кристаллизации) фазовый переход в полипропилене учитывался в интервале температур, используя данные, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Задача решалась численно методом конечных разностей для полипропиленовой трубы PN 20 диаметром 63 мм. Найдены продолжительности градиентного подогрева: 420 с – для трубы, 360 с – для муфты. Для одновременного начала процесса нагрева (оплавления) градиентный подогрев трубы следует начать на 60 с раньше. Абсолютная разность температур на внешних и внутренних поверхностях муфты и трубы после подогрева составляет 60 °С. После градиентного подогрева проводится сварка полипропиленовых труб в раструб с помощью нагревательного устройства, состоящего из гильзы и дорна, с температурой 260 °С. Осуществляется нагрев внутренней поверхности раструба муфты и наружной поверхности конца трубы в течение регламентированного времени.

При сварке без подогрева при допустимых температурах в момент завершения кристаллизации разница температур на внешних и внутренних поверхностях стенок трубы и муфты составляет 45 °С. При сварке с градиентным подогревом эта разница составляет 20 °С. При сварке при допустимых температурах кристаллизация начинается через 3 с после приведения трубы и муфты в контакт и завершается примерно через 1,5 минуты, тогда как при сварке с градиентным подогревом кристаллизация начинается через 5 с и завершается через 7 минут. Расчеты показывают, что при сварке полипропиленовых труб в раструб предварительный подогрев с градиентным распределением температуры по толщине стенок конца трубы и муфты позволяет получить более однородное распределение температуры на стадии кристаллизации сварного шва.

РЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Zn-Mg-Cu С 10% СОДЕРЖАНИЕМ SiC

Смирнов А.С., Белозеров Г.А.*, Коновалов А.В., Швейкин В.П., Муйземнек О.Ю.

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

Металломатричные композиты (ММК) на основе алюминиевой матрицы и армирующих частиц из карбида кремния по сравнению с алюминиевыми сплавами обладают более высокими прочностными характеристиками, сохраняя при этом плотность, близкую к алюминиевому сплаву [1]. Благодаря этому в аэрокосмической индустрии все чаще начинают использовать ММК в качестве конструкционных материалов взамен алюминиевых сплавов. Для придания конструкции требуемой формы и свойств заготовки из ММК могут подвергаться процессам экструзии, штамповки и прокатки в условиях высоких температур. Однако параметры обработки заготовки, разработанные для алюминиевых сплавов, не подходят для ММК из-за наличия в них твердых частиц, которые сильно влияют на реологическое поведение, процессы формирования микроструктуры и пластичность композита.

Цель данной работы исследовать реологическое поведение и формирование микроструктуры при деформировании ММК В95/10%SiC в диапазоне температур 400 – 570 °С и скоростей деформаций 0,1 - 0,25 $с^{-1}$.

Исследованию подвергался металломатричный композит с матрицей из алюминиевого сплава В95 (Al-Zn-Mg-Cu) с 10% объемным содержанием частиц SiC. Композит изготовлен путем спекания смеси порошка из сплава В95 и упрочняющих частиц SiC без последующего компактирования. Средний диаметр частиц порошка из сплава В95 составлял 40 мкм, а размер частиц SiC был 4 мкм. Испытывали на сжатие цилиндрические образцы диаметром 6 мм и высотой 9 мм. Величина относительного обжатия образца в эксперименте составляла 50%. Анализ микроструктуры образцов до и после деформации проводили методом дифракции обратнорассеянных электронов на продольном шлифе в центре и на боковой поверхности, имеющей форму «бочки», которая образовалась в результате существенного влияния контактных сил трения на формоизменение образца.

Установлено, что в диапазоне температур 400-500 °С основным процессом разупрочнения являлась рекристаллизация *in situ*, приведшая к уменьшению среднего диаметра зерен. При этом средний диаметр зерен в центре образца стал меньше, чем на боковой поверхности из-за более высокой накопленной степени деформации образца в центре. При деформации образцов в условиях околосоидусной температуры, равной 570 °С, активно проходил динамический возврат посредством аннигиляции дислокаций, что привело к значительному снижению количества субзерен в остаточной микроструктуре после деформации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РНФ № 14-19-01358 в части исследования реологического поведения металломат-ричного композита.

Литература

1. Pugacheva N. B., Michurov N. S., Bykova T. M. The Structure and Properties of the 30Al-70SiC Metal Matrix Composite Material // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. - 2015. - Iss. 6. - P. 6-18 - DOI: 10.17804/2410-9908.2015.6.006-018.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАВЕРС ОПОР ДЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ИЗ ПУЛТРУЗИОННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА

Васильев С.В., Федоров Ю.Ю.

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

Как показывает практика эксплуатации, деревянные траверсы опор линий электропередач (ЛЭП), подвержены в местах соединения с опорами интенсивной биокоррозии (гниению). Происходящее при этом локальное снижение прочности древесины приводит к возникновению аварийных ситуаций и требует проведения ремонтных работ в кратчайшие сроки.

Композитная стеклопластиковая траверса – более прочная, легкая и экологически безопасная альтернатива траверсам из традиционных материалов. Для изготовления траверс предусмотрено применение стеклопластиковых профилей типа «швеллер» изготовленных по технологии пултрузии.

Нагрузки, которые необходимо обеспечить при проведении стендовых испытаний различных вариантов конструкций траверс для опор ЛЭП, руководствовались нормативным документом «Правила устройства электроустановок» ПУЭ-7 [1] и специальной литературой [2,3]. Стендовые испытания составных стеклопластиковых траверс опор ЛЭП показали их работоспособность с точки зрения обеспечения необходимой несущей способности изделий.

Опытно-промышленные испытания разработанных траверс проводили на действующей ЛЭП ЗЭС ПАО «Якутскэнерго» в г. Мирном Республики Саха (Якутия). Замена траверсы на промежуточной деревянной П-образной опоре ЛЭП 110кВ проводили не спуская стойки при помощи автокрана. В ходе испытаний было установлено, что удобным способом крепления траверсы при замене, является комбинированное крепление, т.е. во-первых производится крепление традиционным болтовым на старом отверстии, а второе крепление хомутами, что позволяет исключить сверлильные работы на высоте.

Опытно-промышленные испытания показали преимущество легкого веса стеклопластика перед традиционными деревянными и металлическими при изготовлении траверс опор ЛЭП, особенно составных. Составную траверсу можно по частям в ручную доставить до места установки, т.к. максимальный вес самой большой составляющей траверсы весит около 30÷35 кг. Преимущество малого веса очевидна при аварийной замене траверсы без применения подъемной техники. Долговечность стеклопластика (более 70 лет) позволяет многократное использование траверсы, в случае замены стоек опор, что отразится на экономии средств при реконструкции ЛЭП.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. Издание 7 переработанное и дополненное – Утв. приказом Минэнерго России от 08.07.2002 №204. – М.: Энергоатомиздат, 2002.
2. Крюков К. П., Новгородцев Б. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. 2е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, Ленингр.отд., 1979. – 312с.
3. Свод правил СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. [Текст]. – Введ. 2011-05-20. – М.: Министерство регионального развития Российской федерации, 2011. – 85 с.

MESOSCOPIC PLASTIC STRAIN LOCALIZATION IN TITANIUM WITH MODIFIED SURFACE LAYER

Balokhonov R.R.[1,2], Martynov S.A. [1], Romanova V.A.[1], Panin A.V. [1], Kazachenok M.S. [1], Batukhtina E.E.[1], Shakhijanov V.S.[3], Zinoviev A.V. [1], Zinovieva O.S. [1]

[1]*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russia, e-mail: martynov@ispms.tsc.ru*

[2]*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia*

[3] *National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia*

Experimentally supported numerical simulation is performed to investigate mesoscale stress-strain localization in surface modified commercial titanium VT1-0. A low-energy high-current electron beam (LEHCEB) treatment is used for melting followed by fast crystallization of a thin surface layer of the titanium [1]. The crystalline microstructure and thickness of the modified surface layer depend on the energy density, with the curvilinear interface being formed between the substrate and the layer (Fig.1a). The calculated microstructure corresponds to that observed experimentally and is taken into account explicitly as initial conditions (Fig.1b). Plane strain dynamic boundary-value problem on the microstructure tension is solved numerically by the finite-difference method [2, 3]. Elastic-plastic constitutive models describe experimentally observed mechanical response of both the substrate and the surface layer.

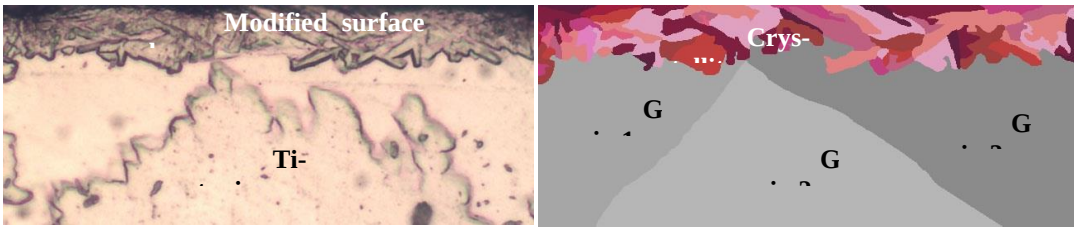


Fig. 1. Experimental a) and simulated microstructures b) of a commercial titanium VT1-0 substrate with modified surface layer produced by means of a LEHCEB surface treatment.

Near-interface plastic strain localization is shown to depend on the local geometry of different interfaces: “grain-grain” in the titanium substrate, “crystallite-crystallite” in the surface layer and “grain-crystallite” along the substrate-surface layer interface. Mesoscale shear bands originate in the grains preferably oriented to the loading direction, and the strain localization in these grains is found to be less pronounced than in grains possessing higher yield stress.

This work is supported by Russian Science Foundation (project № 14-19-00766).

References

1. A.V. Panin, M.S. Kazachenok, O.M. Kretova, O.B. Perevalova, Y.F. Ivanov, A.M. Lider, O.M. Stepanova, M.H. Kroening, The effect of electron beam treatment on hydrogen sorption ability of commercially pure titanium, Applied Surface Science. 284 (2013) 750-756.

2. R.R. Balokhonov, V.A. Romanova, S. Schmauder, S.A. Martynov, Zh.G. Kovalevskaya, A mesomechanical analysis of plastic strain and fracture localization in a material with a bilayer coating, Composites: Part B. 66 (2014) 276–286.

3. R. Balokhonov, A. Zinoviev, V. Romanova, O. Zinovieva, The computational micromechanics of materials with porous ceramic coatings, Meccanica 51 2 (2016) 415–428.

ИССЛЕДОВАНИЕ СКЛОННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ В СЕРОВОДОРОДНОЙ СРЕДЕ

Мушникова С.Ю.[1], Костин С.К.[1], Харьков А.А.[1], Альхименко А.А.[2], Алексеева Е.Л.[2]

[1] *ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», д.49, ул. Шпалерная, г. Санкт-Петербург, 191015, Российская Федерация*
[2] *ГОАУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», д.29, ул. Политехническая, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация.*
e-mail: npk3@crism.ru

При добыче углеводородов становится актуальной проблема коррозионного растрескивания (КР) оборудования, изготовленного из конструкционных сталей, под воздействием сероводорода, присутствующего в пластах залегания нефти (сульфидное растрескивание). Кроме того, сероводород, находящийся в глубоководной зоне мирового океана, в прибрежной промышленной зоне и в районах шельфовых нефтегазовых месторождений, может вызвать КР судостроительных сталей. В связи с этим проведение исследований материалов, предназначенных для эксплуатации в указанных условиях, на склонность к коррозионному растрескиванию в сероводородной среде представляет практический интерес.

В данной работе определение склонности к сульфидному КР металла листового проката и поковок из сталей различных структурных классов и уровней прочности проводилось по стандарту NACE TM 0177 методом одноосного растяжения гладких цилиндрических образцов с постоянной нагрузкой в подкисленном растворе NaCl, насыщенном газообразным H_2S, на установках «КОРТЕСТ». Методика основана на агрессивном воздействии H_2S, вызывающем протекание реакций на поверхности металла, приводящих, в свою очередь, к образованию атомарного водорода, способного охрупчивать металл, усиливая склонность к КР. Образцы испытывались при различных уровнях растягивающего напряжения, составляющих от 30% до 90% от предела текучести. Сопоставление полученных данных с результатами металлографических и фрактографических исследований испытанных образцов, направленных на выявление структурных особенностей в местах зарождения и распространения трещин, позволили предложить возможные механизмы протекания КР, включающие электрохимические процессы растворения и водородного охрупчивания. Обнаружены различия в сопротивляемости КР исследуемых сталей в сероводородной среде и хлоридном растворе 3,5% NaCl, в т.ч. наводороженном при катодной поляризации.

Установлено, что среднелегированные стали, подвергающиеся общей коррозии, начинают проявлять склонность к КР в сероводородной среде по водородному механизму по мере увеличения предела текучести и переходу от бейнито-мартенситной к мартенситной структуре. Показано преимущество по сопротивляемости сульфидному КР низкоуглеродистой бейнито-мартенситной судостроительной стали типа АБ2-2 по сравнению со среднеуглеродистой сталью мартенситного класса 34ХН1МА при одинаковом уровне прочности.

Стойкость сталей аустенитного класса к сульфидному КР определяется их коррозионной стойкостью в кислом хлоридно-сульфидном водном растворе, в т.ч. наличием и устойчивостью пассивной пленки на поверхности образцов, а также механизмом упрочнения сталей. Аустенитная высокомарганцевая сталь 45Г17Ю3, упрочняемая при горячей деформации, не подвергается КР в сероводородной среде благодаря протеканию интенсивной коррозии язвенного характера, тогда как в более нейтральном растворе 3,5% NaCl склонна к КР. Дисперсионнотвердеющая аустенитная сталь 40Н13Г7МД2Ф проявляет склонность к КР как в хлоридном растворе, так и в водородсодержащих средах (при катодной поляризации и в сероводороде). Нержавеющие аустенитные стали с твердорастворным упрочнением могут подвергаться сульфидному КР вследствие склонности к питтинговой коррозии, при этом именно питтинги являются концентраторами напряжения. Сенсибилизация интенсифицирует процессы межкристаллитного сульфидного и хлоридного коррозионного растрескивания.

АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, д.1, ул. Королёва, г. Пермь, 614013, Российская Федерация, e-mail: flower@icmm.ru

При организации систем деформационного мониторинга конструкций и сооружений важное значение имеет математическая модель, которая используется как на стадии проектировки системы, так и на стадии ее эксплуатации. На стадии проектировки системы деформационного мониторинга математическая модель служит для оценки наиболее информативных деформационных параметров, которые нужно контролировать датчиками. С помощью численных экспериментов производится оценка чувствительности датчиков, диапазонов изменения величин, положения на конструкции. Для этого достаточно математической модели, созданной на основе документации и чертежей конструкции. На этапе эксплуатации системы мониторинга такая модель может быть не актуальна по ряду причин: отклонения от проекта, старение материалов, необратимые изменения в конструкции от происходящих деформационных процессов. Поэтому после установки системы мониторинга необходимо подобрать параметры начальной модели, чтобы адекватно описывать деформационные процессы. В процессе мониторинга также могут происходить изменения механических характеристик объекта, которые тоже требуют адаптации математической модели объекта.

Проверка адекватности математической модели, используемой в системе деформационного мониторинга, должна обеспечиваться корреляцией между показаниями разных датчиков. Для этого на основе проектной модели необходимо определить показания каких датчиков (первичных) будут использованы в модели в качестве входных параметров, а показания каких датчиков (верификационных) будут использоваться для верификации модели. Выбор "верификационных" датчиков и мест их установки может быть осложнен тем обстоятельством, что заранее неизвестно, каким воздействиям может подвергнуться конструкция в процессе наблюдения.

В статье показан один из вариантов адаптации математической модели по данным системы мониторинга на примере здания, располагающегося на карсте. На основе результатов численного моделирования в качестве первичных датчиков для данного здания были выбраны датчики измеряющие вертикальные перемещения фундамента. В качестве верификационных датчиков были выбраны датчики, измеряющие наклоны несущих стен сооружения. В ходе мониторинговых наблюдений были зафиксированы изменения показаний датчиков, контролирующих вертикальные смещения фундаментов, а также одного из верификационных датчиков, контролирующих наклон стен.

Математическая модель, созданная на основе документации, качественно описывала деформационное поведение верификационного датчика, на основании данных с первичных датчиков, но количественно наблюдалось расхождение, свидетельствующее о недостаточной адекватности математической модели здания. Была проведена процедура адаптации модели, заключавшуюся в ослаблении конструкционных элементов в некоторой зоне на конструкции. На основе данных мониторинга был осуществлен подбор жесткостных свойств ослабленной зоны на конструкции здания.

Таким образом, в работе предложен вариант структурной схемы деформационного мониторинга конструкции сооружения, которая включает в себя "первичные" и "верификационные" датчики. Показания первых из них используются в модели в качестве входных параметров, а показания других для верификации и адаптации модели. На примере работы системы деформационного мониторинга показан вариант адаптации математической модели к получаемым данным с датчиков различных типов.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИИХ ПРОЦЕССОВ В ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЯХ ТУРБОМАШИН

Тихончук И.С., Сальников А.Ф.

Пермский национально исследовательский политехнический университет, аспирант кафедры Ракетно-космической техники и энергетических установок, д.29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: tis8137@gmail.com, rkt@pstu.com

Турбомашины широко применяются в различных отраслях энергетики, в частности при добыче природного газа и нефтепродуктов. С развитием промышленности требования к турбомашинам возрастают из-за необходимости обеспечения все более высоких производственных задач, что и определяет актуальность совершенствования турбомашин с целью повышения их эффективности, в том числе за счет оптимизации характеристик лабиринтных уплотнений.

Лабиринтные уплотнения являются важной частью турбомашин. Они служат для ограничения утечек рабочей среды вдоль вала из корпуса турбомашины и перетачек между ротором и статором. Работа лабиринтных уплотнений напрямую влияет на производительность турбомашины, поэтому на стадии проектирования необходимо уделять большое внимание подбору конструкции и проработке рабочих характеристик лабиринтных уплотнений. Также одной из важных проблем при проектировании высокоскоростных турбомашин являются возникающие на отдельных режимах работы самовозбуждающиеся колебания и потери устойчивости ротора. В результате многочисленных исследований динамики ротора и практических показаний было доказано, что широко применяемые в турбомашинах радиальные лабиринтные уплотнения оказывают значительное влияние на амплитудно - частотные характеристики роторной системы, что за частую может привести к нештатной работе или выходу агрегата из строя. Отсюда следуют, что при исследовании процессов в радиальных лабиринтных уплотнениях необходимо большое внимание уделять их воздействию на роторную систему.

В данной работе рассмотрены вопросы динамического взаимодействия уплотняемой среды в лабиринтном уплотнении с ротором посредством исследования влияния газодинамических процессов течения и условий колебания давления в зазорах на динамику ротора. Реализован алгоритм расчетов с применением численного моделирования в САПР.

В результате проведенных вычислительных экспериментов получены динамические характеристики течение рабочей среды в лабиринтных уплотнениях с учетом влияния изменения геометрии уплотнения, изменения зазора между роторной и статорной частью при эксцентриситете ротора, получены поля распределения динамических параметров по всей проточной части лабиринтного уплотнения.

Разработанный алгоритм позволяет на стадии проектирования провести оценку влияния расположения гребня лабиринтного уплотнения на эффективность и динамические характеристики работы уплотнения. Кроме того, он позволяет провести оценку влияния на динамику работы лабиринтного уплотнения с учетом амплитудно-частотных характеристик ротора. Структура алгоритма построена таким образом, что позволяет осуществлять моделирование влияния геометрических параметров в широком диапазоне их изменения и определять наиболее оптимальный вариант с учетом колебаний ротора.

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Балина О.В., Нассонов В.В.

Тюменский государственный нефтегазовый университет, д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация, e-mail: nbmk@tsogu.ru

Цель работы является оценка деградации материала трубопроводов после малоциклового нагружения.

В работе представлены результаты исследований влияния усталостного нагружения в малоцикловой области на структуру и свойства трубных сталей.

Исследованы особенности микроструктуры на различных этапах нагружения, изменения твердости, внутренних напряжений, коэрцитивной силы, коррозионной активности. Построены кривые малоцикловой усталости образцов, определены величины накопленной пластической деформации в зависимости от амплитуды напряжений и количества циклов нагружения.

С учетом полученных результатов проведена диагностика фрагмента разрушившегося магистрального нефтепровода из стали 09Г2С и определена величина пластической деформации на основе оценки параметров структуры и физико-механических свойств стали:

- твердости – переносным твердомером;
- коэрцитивной силы – переносным прибором с накладным датчиком;
- коррозионной активности – локальными коррозионными зондами;
- параметров микроструктуры – переносным оптическим микроскопом и использованием реплик с травленой поверхности объекта для последующего исследования РЭМ.

Твердость является чувствительным параметром при определении степени пластической деформации (δ) в интервале 5 – 10 % с абсолютной погрешностью 3 %.

Коэрцитивная сила является самым чувствительным параметрам и позволяет определять величину пластической деформации (δ) в интервале 0,2 – 6 % с абсолютной погрешностью 0,5 %.

Коррозионная активность (ЭДС между деформированным и недеформированным участками) позволяет определять величину пластической деформации (δ) в интервале 0,2 – 6 % с абсолютной погрешностью 0,5 %.

Параметры микроструктуры и анализ размеров зерен позволяют определять области пластической деформации.

Полученные закономерности изменения структуры и свойств при пластической деформации, образование характерного рельефа поверхности, изменения твердости, коэрцитивной силы и коррозионной стойкости на различных этапах циклического нагружения, позволяют определить величину накопленной пластической деформации для оценки степени деградации материала непосредственно на эксплуатирующемся объекте, без вырезки образцов, при помощи переносных измерительных приборов.

THREE-DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF MAGNETIC FIELD AND FLUX IN LOCALLY MAGNETIZED TWO-LAYER FERROMAGNETIC OBJECTS

Kostin V.N. [1,2], Vasilenko O.N. [1,2], Porseva A.M. [2], Kabakova A.A. [2]

[1]*Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Sof'i Kovalevskoi 18, Yekaterinburg, 620041 Russia*

[2]*Ural Federal University, ul. Mira 29, Yekaterinburg, Russia*

e-mail: kostin@imp.uran.ru

There are several widely used methods of face hardening of steel articles in modern machine building. Generally the quality of face hardening is evaluated by hardness and depth of hardened layer. In some cases it is necessary to determine the hardness of not hardened core.

Due to the fact that destructive methods are complex and labor-consuming and can't be used to control all articles, determination of the hardness and depth of hardened layer using non-destructive methods is relevant to present day. There are works on the determination depth of hardened layer applying ultrasonic inspection, however coercimetric methodic of inspection of the hardened layer has more prevalent practical.

The development of new and more advanced methodics of face hardening magnetic testing requires research three-dimensional distribution of magnetic flux at locally magnetized two-layer ferromagnetic object which is a task of a present work.

The research was made by numerical simulation using ANSYS program [1]. Methodics of executing the calculation is described in details in works [2, 3].

Numerical simulation of spatial distribution of the magnetic field and the flux in two-layer objects is executed. Possibility of measurement of depth of a high-coercive layer on a magnetosoft core by measuring the magnetic field measured on the surface of the object in the interpolar space of the U-shaped electromagnet is theoretically and experimentally shown.

Experimentally and by means of numeric modelling an opportinity to determine hardened layer depth on a surface of soft-magnetic core by magnetic field value on locally magnetized object surface was established. Comparing with coercimetric methodic a range of controlled thickness might exceed attached electromagnet thickness.

Development of methodics and devices which would use express measurement necessary magnetic parameters using the only transducer for selective detection of hardened layer parameters would be very useful.

Reference

1. Parallel'nye vychisleniya v UrO RAN. Zapusk programm iz paketa ANSYS. URL: http://www.parallel.uran.ru/node/264.

2. Simulation of field and inductance spatial distribution in locally magnetized massive objects and optimization of U-shaped transducer design / V. N. Kostin, O.N. Lukinykh, Ya.G. Smorodinskii et al. // RJNDT. – 2010. – Vol. 46, Issue 6 – P. 403-410. DOI: 10.1134/S1061830910060021.

3. Vasilenko O.N., Kostin V.N. The topography of the field and flux inside and above the surfaces of ferromagnetic plates during their contact and contactless magnetization // RJNDT. – 2013. – Vol. 49, iss. 9. – P. 510-518. DOI: 10.1134/S1061830913090106.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ ДЛЯ БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Пургин А.А.

Уральский Федеральный Университет, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: a.a.purgin@gmail.com

Развитие современной промышленности и строительства сопровождается постоянным дефицитом ресурсов, поэтому проблема оптимального проектирования является одной из наиболее острых проблем, стающих перед человечеством. В контексте проектирования механических систем одним из важнейших критериев является стоимость конечного изделия. Особенно этот критерий становится важен при проектировании сооружений, так как сооружения представляют собой механические системы колоссальных размеров, состоящих из отдельных элементов-конструкций, не оптимальное планирование которых, может привести к значительному снижению инвестиционной привлекательности сооружения.

К сожалению, задача поиска оптимальной конфигурации является сложной и комплексной проблемой, несмотря на значительное развитие математического программирование. Поиск оптимальной конфигурации представляет собой обратную задачу математического моделирования (ОЗММ), решение которой на несколько порядков сложнее, чем решение прямой задачи математического моделирования. Основные сложности ОЗММ заключаются во множестве оптимальных решений, нелинейности получаемых уравнений; отсутствии быстрых и универсальных способов решения общей задачи нелинейного программирования (отыскания глобального оптимума при не выпуклой целевой функции).

Для конечного пользователя-проектировщика это выражается в практически полном отсутствии программного обеспечения, решающего ОЗММ в контексте механических систем, в то время как, программных комплексов, решающих прямую задачу математического моделирования уже достаточно много. Для решения ПЗММ эти программные комплексы в подавляющем случае используют метод конечных элементов.

В данной работе рассматривается совместное применения метода конечных элементов и нелинейного математического программирования (НМП), для решения ОБМЗ механических систем в контексте систем, представляющих собой совокупность балочных элементов.

В качестве критерия оптимальности выбран минимум суммарной массы рассматриваемой системы. Ограничения, наложенные на каждый элемент системы, представляют собой условия обеспечения прочности по нормальным и касательным напряжениям. Для решения полученной нелинейной задачи оптимизации используются такие методы как, метод последовательного квадратичного программирования (SQP), явный методом Ньютона и методом Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS). На основе анализа эффективности данных алгоритмов выбраны наиболее подходящие из них к нашей задаче. Рассматриваются некоторые возможности ускорения решения, такие как учет разрежённости матрицы жесткости, получаемой методом конечных элементов, что даст значительные преимущества для линейного программирования, являющейся подзадачей метода SQP, и решения вспомогательной СЛАУ, возникающей в методе Ньютона.

ТЕПЛОВАЯ ДИАГНОСТИКА ТРЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

Тихонов Р.С.[1], Старостин Н.П.[2]

Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, д. 20, ул. Автодорожная, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), 677007, Российская Федерация,
e-mail: [1] roman_tikhon@mail.ru, [2] nikstar56@mail.ru

При проведении стендовых и эксплуатационных испытаний узлов трения машин и механизмов существующими устройствами не удается измерить силу трения, что существенно снижает информативность таких испытаний и достоверность методов диагностики технического состояния исследуемого трибосопряжения. В данной работе предлагается развитие метода тепловой диагностики трения, позволяющего определять функции фрикционного тепловыделения и соответственно моменты сил трения в системе подшипников с учетом движения вала. Суть метода состоит в следующем: в окрестности зоны контакта во втулках производятся замеры температуры по времени, строится математическая модель теплового процесса в узле трения и решением граничной обратной задачи восстанавливается фрикционное тепловыделение, коррелирующее с моментом трения.

Принимая допущение об однородности распределения температуры по длине подшипника и корпуса, нестационарные температурные поля в подшипниках скольжения описывались двумерными квазилинейными уравнениями теплопроводности, а для вала - трехмерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах с конвективным членом, учитывающим его движение. В зоне трения записывалось условие распределения теплового потока, возникающего в результате трения. На остальных границах задавались традиционные условия первого и третьего рода. Начальное распределение температуры считалось однородным.

Для решения поставленной граничной обратной задачи теплопроводности использовался известный метод итерационной регуляризации на основе градиентных методов минимизации функционала. В частности, применялся один из эффективных методов минимизации функционала - метод сопряженных градиентов. Для повышения скорости приближения к минимуму функционала невязки шаги спуска для каждой функции тепловыделения в подшипниках выбираются различными. Процесс уточнения приближенного решения завершается по условию итерационной регуляризации, согласуя значение невязки с количественной характеристикой погрешности температурных данных.

В вычислительных экспериментах задавались модельные функции интенсивности тепловыделения для каждого подшипника, затем, используя эти функции, решалась прямая задача, и ее точные решения в соответствующих точках замера во втулке брались в качестве «экспериментальных» температурных данных. Вычислительные эксперименты по восстановлению функций фрикционного тепловыделения с имитацией погрешностей в температурных данных показали устойчивость решений, полученных разработанным алгоритм.

При решении обратной задачи в широком интервале времени, вследствие необходимости хранения в оперативной памяти компьютера значений температур по пространственным переменным на каждом временном слое, возникает проблема нехватки памяти. Во избежание возникновения таких ситуаций на ПЭВМ предлагается полный интервал времени испытаний разбить на локальные, в которых последовательно восстанавливать удельные мощности трения. Распределения температуры на конце локального интервала брались в качестве начального распределение температуры на следующем локальном интервале времени. Вычислительными экспериментами показано, что при таком восстановлении вычислительные ошибки не переходят на последующие локальные интервалы времени и не накапливаются.

Приводятся результаты экспериментальной проверки эффективности восстановления момента сил трения в системе подшипников скольжения на вращающемся с невысокой скоростью валу по температурным данным на неподвижных втулках путем сопоставления расчетных значений момента силы трения со значениями, полученными непосредственным измерением. Установлено, что согласование значений суммарного момента трения в системе подшипников, полученных с помощью принципиально разных методов, находится в пределах 10–15 %.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА И ДИСКРЕТНЫХ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Петрова П.Н., Майер А.Ф.

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

В данной работе рассматривается влияние ультразвуковых колебаний и базальтового волокна на износостойкость и деформационно-прочностные свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Установлено, что использование ультразвука в качестве внешнего энергетического воздействия и активации дисперсного порошка СВМПЭ позволяет достичь повышения его механических характеристик на 15-18%, а износостойкости в 2-2,5 раза. Это связано тем, что ультразвуковое воздействие является своеобразным катализатором изменения структуры аморфно-кристаллического полимера в результате ламеллярная структура исходного СВМПЭ трансформируется в сферолитную.

Использование базальтового волокна в качестве наполнителя приводит к повышению износостойкости СВМПЭ в 3-5 раз, при этом для улучшения совмещения волокна с полимерной матрицей использован метод совместной механоактивации компонентов. Установлено, что при повышении концентрации базальтового волокна до 5 мас. % деформационно-прочностные характеристики несколько снижаются, при этом повышается модуль упругости композитов в 1,5 раза, что является положительным явлением, поскольку в большинстве случаев при функционировании материала это определяет устойчивость материала под нагрузкой без пластической деформации (табл.1).

Таблица 1 – Физико-механические и триботехнические характеристики композиционного материала на основе СВМПЭ и базальтового волокна, подвергнутых совместной активации

Композит	$\sigma_р$, МПа	$\varepsilon_р$, %	Е, МПа	I, мг/ч	*f*
СВМПЭ-	39	356	765	0,49	0,40
СВМПЭ+1 мас.% БВ	41	337	1007	0,12	0,28
СВМПЭ+2 мас.% БВ	40	316	1050	0,20	0,43
СВМПЭ+3 мас.% БВ	38	297	1055	0,26	0,32
СВМПЭ+4 мас.% БВ	38	284	1036	0,20	0,34
СВМПЭ+5 мас.% БВ	39	299	1107	0,10	0,35

Примечание: $\sigma_р$-прочность при растяжении; $\varepsilon_р$-относительное удлинение при разрыве; Е-модуль упругости; I- скорость массового изнашивания; *f*-коэффициент трения

Для определения оптимальных условий трения в данной работе был использован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^k, позволяющий построить уравнение регрессии второго порядка. Для оптимизации процесса трения были выбраны следующие пределы – нагрузка от 150 Н до 220 Н; скорость вращения контртела– от 150 об\мин (0,37 м/с) до 200 об\мин (0,5 м/с); массовая доля базальтового волокна в композите составляла от 1% до 5%, на основании проведенного факторного эксперимента составлено уравнение регрессии скорости изнашивания СВМПЭ в зависимости от концентрации БВ и условий трения. Установлено, что оптимальными условиями трения композитов СВМПЭ с базальтовым волокном для 1 мас. % наполнения - 150 Н и 0,37 м\с, для 5 мас.% наполнения - 220 Н и 0,5 м\с.

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF VT23 WELDED JOINTS RESULTING FROM LASER WELDING

Smirnova A.S.[1,2], Malikov A.G.[3], Panin V.E.[1,2], Pochivalov Y.I.[1], Orishich A.M.[3], Gorbunov A.V.[2]

[1]*National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia*
[2]*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russia*
[3]*Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1, Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russia*
e-mail: nasO@mail2000.ru

Nowadays one of the most perspective high-strength material types of joints is laser welding which is characterized by a number of advantages. They are formation of a narrow welded joint and a quite smaller heat-affected zone. However, there is also a problem of receiving qualitative welded joints of titanium alloys. It relates to the formation of a large number of pores in a welded joint and the precipitation of unwanted phases when welding titanium alloys. In ISPMS SB RAS the method of a surface treatment of welded joints with the use of ultrasonic equipment is widely used now. It significantly allows to improve fatigue characteristics of welded joints. Welded joints were received in the process of laser welding with the use of CO_2-laser developed by laboratories of ITPMS SB RAS.

In this work the structure and mechanical properties of the welded joints of VT23 titanium alloy received by method of laser welding with the subsequent thermomechanical processing (TMT1 and TMT2) including ultrasonic mechanical forging was investigated.

The structure of the initial metal of VT23 alloy is typical for the rolling a+β titanium alloys and characterized anisotropy of structure. Grains have the form of the flattened plates, which are strongly extended in the rolling direction**.** The texture size in this range reaches ~170x15 μm with the microhardness of 3000 MPa. The structure of welded joint formed by laser welding has a gradient highly non-equilibrium coarse-grained structure based on α-phase with the grain size up to ~ 600x280 μm and the microhardness of 3500MPa. A large number of pores is observed in the welded joint. After TMT1, the microhardness in a zone of welded joint has increased to 3800 MPa, and in HAZ it has decreased to 3300 MPA. After TMT2 the grain size in welded joint has decreased to 380x80 μm, and microhardness has remained at the same level.

The strength tests of welded joints VT23 titanium alloy have been carried out for research of their mechanical characteristics. According to the obtained results after TMT1 and TMT2, the ductility enhances while the ultimate strength is hardly changed.

The performed low-cyclic fatigue tests have revealed the efficiency of heat treatment application in combination with ultrasonic forging of welded joints**.** According to the presented data, the fatigue life of the VT23 welded joints processed on the TMO2 increases more than three times compared with the fatigue life of the untreated welded joints.

The low-cyclic fatigue tests researches of welded joint fractures have shown that after TMO2 the relief is more developed, the crack extends on HAZ as a shear flow, while in specimens in an initial state and after TMO1, the crack distributes across the fusion zone. High dissipative properties of the treated material surface layer provide an effective relaxation of the tension, consistently involving the next volumes in plastic deformation.

The obtained experimental tests have revealed the fact that the fatigue life of the VT23 welded joints with TMT2 provides multiple increase of the fatigue life as opposed to the untreated welded joints.

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ, РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Москвичев В.В.

СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН, д. 53, пр. Мира, г. Красноярск, 660049 Российская Федерация,
e-mail: sktb@ksc.krasn.ru

Рассмотрены общие тенденции развития, направления исследований, обеспеченность расчетного комплекса и предельные состояния объектов техносферы. Дана характеристика расчетных моделей и базовых уравнений, алгоритм расчетов по критериям механики разрушения с формулировкой прямых и обратных задач прочности, ресурса и безопасности.

Для условий упругопластического разрушения плоских и оболочечных элементов конструкций с трещинами развита концепция анализа предельных состояний на основе уравнений J-проектных кривых и коэффициентов интенсивности деформации. Разработана концепция ресурсного проектирования сварных конструкций, использующая методологию статистических испытаний, численные расчеты НДС, функции характеристик дефектности, нагруженности, трещиностойкости и кинетические уравнения повреждаемости.

Приведены результаты исследований ряда прикладных задач:

- оценка ресурса лопастей воздушных винтов самолетов;
- оценка надежности и риска сварных элементов ВВЭР-1000;
- анализ трещиностойкости ферменных конструкций космических аппаратов (КА);
- анализ прочности и ресурса ксенонового бака высокого давления для апогейных двигателей КА;
- модельные расчеты долговечности при экспертизе причин аварии Саяно-Шушенской ГЭС;
- оценка остаточного ресурса рабочих колес гидротурбин Красноярской ГЭС.

Обозначены направления перспективных исследований в области конструкционного материаловедения и диагностики, безопасности и риск-анализа технических систем.

ВНЕВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ НАПЛАВКА Ti-Ta-Zr СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТИТАНА ВТ1-0

Самойленко В.В., Поляков И.А., Матц О.Э.

Новосибирский государственный технический университет, д. 20, пр. К.Маркса, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация, e-mail: samoylenko.vitaliy@mail.ru

На данный момент доля тантала как конструкционного материала в промышленности увеличивается. Отличительной особенностью тантала является высокая коррозионная стойкость в большинстве агрессивных сред, которая в отдельных случаях превосходит коррозионную стойкость платины. Однако существенными недостатками тантала являются высокая стоимость и большая плотность (16,6 г/см^3), что значительно сужает область его применения. Обеспечить экономию дорогостоящего металла можно путем создания танталсодержащих слоев на поверхности менее дефицитного материала. Кроме того, при получении поверхностно легированных слоев рационально заменить часть тантала элементом, обладающим сопоставимым уровнем коррозионной стойкости и значительно меньшим весом (цирконий).

В связи с этим цель работы заключалась в получении поверхностно легированных танталом и цирконием слоев, а также в исследовании их структуры и свойств. В качестве технологии формирования слоев использовали вневакуумную электронно-лучевую наплавку. Материалом основы служили заготовки из технически чистого титана ВТ1-0 размером 100x50x12 мм. Технологические эксперименты по формированию поверхностно легированных слоев проводились в ИЯФ СО РАН на ускорителе электронов ЭЛВ-6.

Непосредственно перед обработкой на поверхность титановый заготовки наносилась смесь порошков Ta, Zr и флюса в количестве: 36 % (вес.) Ta, 32 % (вес.) Zr, 32 % (вес.) флюс. В качестве флюса выступала смесь фтористых солей кальция и лития в соотношении 3:1 по весу. Затем титановая заготовка со сформированным порошковым слоем устанавливалась на подвижный стол на расстоянии 90 мм от выпускного отверстия ускорителя. С целью увеличения производительности электронно-лучевой обработки поверхность заготовки сканировалась пучком в поперечном направлении с размахом 50 мм. Ток пучка составил 23 мА. Скорость перемещения заготовки относительно выпускного отверстия ускорителя была 10 мм/с. В результате обработки на поверхности титана были сформированы слои толщиной ~ 2 мм.

Структура наплавленных слоев имеет дендритное строение. Дендритные кристаллы преимущественно ориентированы в направлении от границы с нерасплавившимся материалом основы в сторону поверхности. При больших увеличениях строение слоя представлено структурой пластинчатого типа. Подобная структура формируется в титановых сплавах при ускоренном охлаждении вследствие подавления диффузионных механизмов превращения. Поскольку в процессе электронно-лучевой наплавки порошковая смесь и поверхность титановой заготовки нагреваются до температуры плавления, а температура основания заготовки соответствует комнатной, то между данными частями возникает градиент температур.

Для оценки уровня механических свойств проводились испытания на статическое растяжение и ударный изгиб. Среднее значение предела прочности наплавленных слоев составило 409 МПа. В то время как прочность титановой основы - 314 МПа. Ударная вязкость оценивалась на образцах «титан – Ti-Ta-Zr слой» с V-образным концентратором напряжения, расположенным перпендикулярно сформированному слою. В качестве контрольных образцов выступали образцы из технически чистого титан ВТ1-0. Значение ударной вязкости титана ВТ1-0 составило 266 Дж/см^2. Наплавка Ta и Zr приводит к падению уровня ударной вязкости до 173 Дж/см^2. Однако несмотря на падение ударной вязкости материала, она остается на достаточно высоком уровне.

Таким образом можно сделать вывод что вневакуумная электронно-лучевая обработка позволяет сформировать на поверхности титановых заготовок Ti-Ta-Zr слои толщиной 2 мм. Наплавленные слои имеют преимущественно дендритное строение. Прочность наплавленных слоев составляет 409 МПа. Ударная вязкость биметаллической композиции - 173Дж/см^2.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Au-Ni

Лязгин А.О. [1], Шугуров А.Р.[1], Панин А.В.[1,2]

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

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

e-mail: lyazgin@list.ru

Гальванические покрытия на основе золота широко применяются в электронной промышленности с целью уменьшения контактного сопротивления и защиты от окисления различных соединителей. Одним из важнейших требований, предъявляемых к данным покрытиям, является их высокая износостойкость, поскольку надежность технических характеристик соединителей в процессе эксплуатации напрямую связана с процессами трения и износа. В процессе трибологического контакта в покрытиях происходит накопление повреждений, формирование микропор и трещин, что должно оказывать влияние на их электрическое сопротивление. Кроме того, анализ морфологии поверхности трения, непрерывно изменяющейся в процессе трибологических испытаний, позволяет детально исследовать механизмы изнашивания гальванических покрытий и выработать рекомендации по увеличению их износостойкости. Однако при численном описании эволюции рельефа трущихся поверхностей возникают значительные трудности, поскольку традиционно применяемые для этого характеристики зависят от масштаба проводимых измерений и разрешающей способности микроскопа. В последние годы для триботехнического анализа было предложено использовать фрактальный подход, который является инвариантным по отношению к изменению масштаба. В сочетании с атомно-силовой микроскопией (АСМ), которая позволяет с высоким разрешением определить реальные размеры деталей рельефа в трех измерениях, фрактальный анализ может обеспечить надежную оценку изменения состояния поверхностей твердых тел в процессе износа. Целью данной работы является исследование деградации электрических свойств гальванических покрытий Au-Ni при изнашивании, а также возможности применения фрактального анализа АСМ-изображений для численного описания изменений их морфологии поверхностей трения.

Проведенные исследования позволили выявить корреляцию между стадийностью изнашивания гальванических покрытий Au-Ni при сухом трении по схеме «палец-диск» и изменениями их электрического сопротивления, которое измеряли четырехзондовым методом. Стадия приработки, на которой происходит сглаживание исходного рельефа покрытия и формирование выраженного бороздчатого рельефа, характеризуется примерно одинаковым значением его электрического сопротивления. Формирование слоя переноса на контртеле, состоящего из деформационно-упрочненных частиц износа, обусловливает образованию глубоких борозд на поверхности трения покрытия и рост его электросопротивления. На стадии установившегося износа имеет место слабый рост величины электросопротивления до тех пор, пока не возникает сильный адгезионный износ покрытия посредством отрыва его крупных фрагментов от промежуточного подслоя Ni-B. Это позволяет использовать зависимость электрического сопротивления для определения различных стадий износа гальванических покрытий и прогнозирования их износостойкости.

Фрактальный анализ АСМ-изображений поверхностей трения покрытий Au-Ni на стадии приработки и установившегося износа, на которых изменение деформационного рельефа преимущественно связано с пластическим оттеснением материала покрытия на микроуровне, показал, что фрактальная размерность профиля поверхности трения покрытий может являться мерой для численной оценки эволюции ее морфологии в процессе трибологического нагружения. Эта характеристика позволяет разделить стадии образования на поверхности трения покрытия крупных борозд и их постепенного измельчения. Поскольку морфологическая структура поверхностей трения оказывает существенное влияние на их триботехнические характеристики, то величина фрактальной размерности может использоваться для количественного описания их изменений в процессе изнашивания.

ВЛИЯНИЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1

Воронин С.В., Ледяев М.Е., Лобода П.С.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)", д. 34, Московское шоссе, г. Самара, 443086, Российская Федерация,

e-mail: voronin@ssau.ru, sillmarllion@mail.ru, stimulator90@mail.ru

Для развития техники необходимо создание материалов с высокой весовой эффективностью. Такие материалы сочетают в себе высокие механические характеристики и малый вес. Добиться такого эффекта возможно путем введения в объем материала дефектов структур. В качестве таких дефектов мы предлагаем использовать замкнутые сферические поры, которые могут выполнять роль упрочняющей фазы. Такие дефекты при определенном расположении не только смогут сохранить или повысить прочность основного материала, но и уменьшить плотность материала.

Поэтому целью данной работы является количественная оценка влияния гексагональной структуры, при которой поры расположены в вершинах воображаемых сопряженных шестигранников пор, на предел текучести материала.

Определение механических свойств проводилось в программной среде MSC.Marc, основанной на методе конечных элементов. В целях снижения временных затрат на построение моделей образцов необходимой геометрии и пористой структуры был написан ряд программ-приложений на языке программирования Python. Конечно-элементная модель образца строилась по принципу заполнения необходимого пространства копированием элементарной ячейки с порой диаметров 10 мкм. Линейные размеры ячейки зависят от выбранной пористости. Для создания корректных условий приложения усилий к конечно-элементной модели образца по торцам были построены буферные зоны из компактного материала. Конечным элементам задавались механические свойства сплава АД1М в отожженном состоянии.

Полученный ряд конечно-элементных моделей образцов с разной пористостью подвергался одноосному растяжению с усилиями, вызывающими напряжение 50 МПа, что превосходит предел текучести для данного сплава, но не превышает его предела прочности. Далее расчетным способом строились диаграммы растяжения, по которым сравнивались пределы текучести модели компактного образца с моделями пористых образцов.

При анализе полученных диаграмм растяжения было установлено, что увеличение пористости материала до 20 % приводит к снижению предела текучести и увеличению пластических свойств образца. При незначительной пористости образца предел текучести пористого материала приближается к пределу текучести компактного материала, и даже превосходит его. Так при пористости 0,1 % наблюдалось увеличение предел текучести на 1,02 % по сравнению с компактным материалом.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1 С «ШАХМАТНЫМ» РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОР

Воронин С.В., Ледяев М.Е., Лобода П.С.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)", д. 34, Московское шоссе, г. Самара, 443086, Российская Федерация,

e-mail: voronin@ssau.ru, sillmarllion@mail.ru, stimulator90@mail.ru

Для создания конкурентоспособной техники промышленности необходимы новые материалы, которые обладают высокими удельными механическими характеристиками. Такие материалы обладают высоким уровнем прочности и малой плотностью. Для достижения данного эффекта в объем основного материала добавляют легирующие элементы, которые образуют упрочняющие фазы. Однако плотность таких фаз, как правило, больше, чем у основного материала и легирование приводит к увеличению массы. Для снижения веса в объем основного материала предлагается вводить пустоты – поры, которые обладают «нулевой» плотностью. По нашему мнению, определенное расположение пор позволит не только сохранить прочностные свойства основного материала, но и улучшить их.

Поэтому целью работы является количественная оценка влияния упорядоченной «шахматной» структуры пор на предел текучести материала.

В данной работе рассматривается структура с «шахматным» расположением пор, при котором межцентровые расстояния пор равны в продольном и в поперечном направлениях, но каждый нечетный ряд смещен на половину межцентрового пространства.

Конечно-элементная модель образца материала с пористой структурой строилась путем копирования элементарной ячейки, линейные размеры которой менялись в зависимости от выбранной пористости образца, с порой диаметром 10 мкм. Для создания равномерного приложения граничных условий к конечно-элементной модели по торцам образца были построены буферные зоны из компактного материала. Конечным элементам задавались механические свойства алюминиевого сплава АД1М. Для оптимизации построения моделей образцов был написан ряд программ-приложений на языке программирования Python. Исследование проводилось в программе инженерного анализа и моделирования MSC Marc, основанной на методе конечных элементов.

Построенный ряд конечно-элементных моделей образцов с разной пористостью подвергался одноосному растяжению с усилием, вызывающими напряжение 50 МПа, что выше предела текучести для данного сплава, но ниже его предела прочности. Затем строились диаграммы растяжения, по которым сравнивались пределы текучести моделей пористых образцов с компактным.

При анализе полученных диаграмм растяжения было установлено, что увеличение пористости материала до 20 % приводит к снижению предела текучести и увеличению пластических свойств образца, что вполне закономерно. Однако при пористости образца 0,4 % предел текучести материала приблизился к пределу текучести компактного материала. По мере дальнейшего уменьшения пористости наблюдался рост предела текучести материала, и при пористости 0,1 % предел текучести вырос на 2,77 % по сравнению с компактным материалом.

THE INFLUENCE OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE STEEL SUBSTRATE ON THE MACROSCOPIC STRENGTH OF THE COATED MATERIAL

Balokhonov R.R.[1,2], Zinoviev A.V.[1], Romanova V.A.[1], Martynov S.A.[1], Zinovieva O.S.[1]

[1]*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russia, e-mail: zav@ispms.tsc.ru*

[2]*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia*

The influence of the substrate grain size and geometry of the interface between the porous ceramic coating and steel substrate on the strength characteristics of the composite material is discussed. A plane strain boundary value problem is solved numerically by the finite difference method. The coating and substrate are described as elastic–brittle and elastic–plastic solids, respectively. Mesomechanical model incorporates the energy fracture criterion taking into account crack origination in local tensile regions. An approach for generation of curvilinear meshes is developed to describe actual geometry of interfaces [1]. The substrate microstructure is created by cellular automata model based on the approach suggested by Rappaz and Gandin [2].

Plane strain uniaxial compression of the material “porous ceramic coating – steel substrate” in the direction perpendicular to the interface between the coating and the substrate is analyzed numerically. The substrate grain size is varied from 5 to 30 microns (Fig. 1, a–c). Yield strength depends on the grain size according to the Hall–Petch law. Three types of microstructures are examined: (i) homogeneous substrate with the plane “coating – substrate” interface; (ii) polycrystalline substrate with the plane “coating – substrate” interface; (iii) polycrystalline substrate with the curvilinear “coating – substrate” interface.

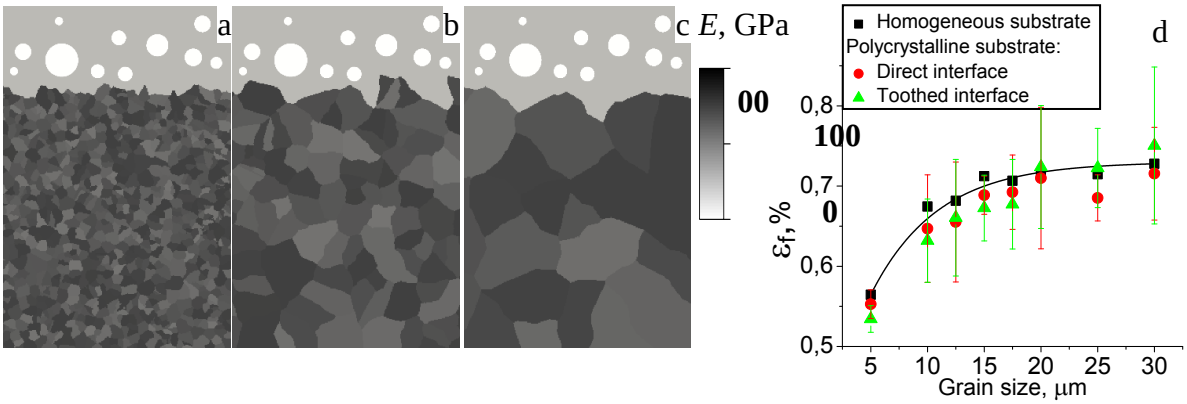


Fig. 1. Model microstructures with the average grain size of the substrate 5 (a), 15 (b) and 30 μm (c) and the strain of the fracture onset ε_f vs. the average grain size (d)

The strain of the fracture onset is shown to increase exponentially with increasing in the grain size (Fig. 1 d). Crack location in the coating is found to be different for varying grain size in the substrate. The curvilinear interface between the coating and substrate is shown to be neither negative nor positive factor influencing the strength properties of the composition.

This work is in the frame of the Fundamental Research Program of the State Academies of Sciences for 2013–2020.

References

1. R. Balokhonov, A. Zinoviev, V. Romanova, O. Zinovieva, The computational micromechanics of materials with porous ceramic coatings, Meccanica 512 (2016) 415–428.

2. O. Zinovieva, A. Zinoviev, V. Ploshikhin, V. Romanova, R. Balokhonov, A solution to the problem of the mesh anisotropy in cellular automata simulations of grain growth, Comput. Mater. Sci., 108 (2015) 168-176.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ АНАЛИЗА НДС МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Буров А.Е.

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» ИВТ СО РАН, д. 53, пр. Мира, г. Красноярск, 660049, Российская Федерация, e-mail: andrey@icm.krasn.ru

Благодаря высоким показателям весовой эффективности, металлокомпозитные баки высокого давления (МКБВД) находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности, прежде всего в авиа-, ракето- и спутникостроении. Однако существуют определенные трудности в прогнозировании механического поведения МКБВД, связанные с неоднородностью композитов и многообразием предельных состояний материалов и элементов конструкции.

Цель настоящей работы состоит в разработке и сравнительном анализе вычислительных конечно-элементных моделей, используемых для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции МКБВД под действием внутреннего давления. Рассмотрены оригинальные пользовательские процедуры построения трехмерных и осесиметричных моделей МКБВД, интегрированные в коммерческий пакет инженерного анализа. Модели включают изотропный герметизирующий лейнер и силовую слоистую оболочку, которые взаимодействуют по контактирующим поверхностям с учетом сил трения. Лейнер может быть задан путем импорта соответствующей твердотельной модели или функциями, определяющими форму меридиана и толщину стенки. Геометрические характеристики композитной оболочки, такие как распределения толщины и угла армирования вдоль образующей рассчитываются на основе уточненных соотношений, учитывающих эффекты конкретного способа и последовательности непрерывной намотки, заданную ширину армирующей ленты и условие сохранения объема материала в зоне полюсного отверстия. Расчет ведется в нелинейной постановке, учитывающей не только физическую, но и геометрическую нелинейность, связанную с изменением формы бака под действием нагрузки.

Представлены результаты расчетов НДС элементов конструкции МКБВД, анализируются особенности их деформирования при различном уровне нагружения. Отмечаются достоинства и ограничения моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России, в ходе реализации проекта по Соглашению №14.607.21.0038 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», RFMEFI60714X0038».

ИЗМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСТВОРЕННОГО ВОДОРОДА ПОСЛЕ УЛЬТАЗВУКОВОЙ ПИН-ОБРАБОТКИ ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ СВАРНОГО ШВА

Полянский В.А.[1], Беляев А.К.[1], Арсеньев Д.Г.[2], Яковлев Ю.А.[1], Полянский А.М.[3], Стошка М.[4]

[1]*Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, д.29, ул. Политехническая, г. Санкт-Петербург, 195294, Российская Федерация, e-mail: vapol@mail.ru*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, д.7-9, Университетская наб., г. Санкт-Петербург, 195294, Российская Федерация*

[3]*ООО «НПК Электронные и Пучковые Технологии», д.6, ст. Броневая, г. Санкт-Петербург, 198188, Российская Федерация*

[4]*Монтана университет, д.18, ул. Франца Иосифа, г. Леобен, А-8700, Австрия*

Ультразвуковая ПИН обработка околошовной зоны сварного шва является примером малого воздействия, которое оказывает существенное влияние на прочность конструкции. Ударный механизм имеет диаметр ударника около 1–3 мм и частоту ударов 20–30 кГц. С помощью этого механизма обрабатывается примерно 5–10 % околошовной зоны, происходит пластическая деформация глубиной в десятые доли миллиметра. Вместе с тем, такая обработка позволяет существенно увеличить усталостную прочность всей сварной конструкции, фактически шов перестает быть «слабым местом».

Очевидно, что такая обработка имеет чисто поверхностный эффект, а если учесть, что ширина обработанной дорожки составляет примерно 1 мм, при общей ширине околошовной зоны порядка 10 мм, то и поверхностный эффект можно признать незначительным с точки зрения механики деформированного твердого тела. Необходимо учесть, что поверхность после обработки содержит пластические отпечатки ударника, то есть получается неровной, что дополнительно должно уменьшать усталостную прочность.

Имеются различные объяснения достигаемого экспериментально положительного результата, мы исходили из того, что согласно обширным литературным данным водород играет ведущую роль при растрескивании сварного шва и это касается всех видов растрескивания: горячих, холодных трещин и усталостного разрушения. Причем основную роль играет водород с низкой энергией связи, который называется диффузионным.

Нами были проведены исследования энергетического распределения водорода в сварном шве и околошовной зоне до и после ПИН-обработки. Выполнены экспериментальные исследования с образцами сварного шва стали S355 (отечественный аналог 17Г1С). Полученные данные по высокотемпературной вакуум-экстракции водорода аппроксимированы с помощью модели многоканальной диффузии. С помощью этой модели по экспериментальным данным были определены энергии связи естественного водорода, который приводит к образованию трещин в сварном шве и околошовной зоне. Никакого специального насыщения водородом не проводилось.

Установлено, что при ПИН обработке средние концентрации водорода в околошовной зоне меняются несущественно из-за малой площади обработанной поверхности. Главным эффектом является изменение соотношения диффузно-подвижного и сильно связанного водорода. Концентрация диффузно-подвижного водорода уменьшается в два три раза, что приводит к блокированию процессов образования холодных и усталостных трещин.

Обнаруженные нами эффекты важны для технологий обработки сварного шва и позволяют строить новые модели усталостного разрушения инициированного водородом на основании различных моделей влияния водорода на структуру и свойства материалов.

Проведенные данные иллюстрируют возможности водородной диагностики, как метода исследования причин разрушения конструкций и разработки технологий увеличения несущей способности конструкций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00091)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Беляев А.К., Грищенко А.И., Лобачев А.М., Мансырев Д.И., Модестов В.С., Пивков А.В., Полянский В.А., Третьяков Д.А., Штукин Л.В.

Санкт-Петербургский Политехнический университет имени Петра Великого, д.29, ул. Политехническая, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация,
e-mail: vice.ipme@gmail.com

Измерения относительной разности в скорости прохождения ультразвуковой поперечной волны различной поляризации (акустической анизотропии) являются одним из стандартных методов неразрушающего контроля деталей и узлов конструкций. Для чистых упругих деформаций метод стандартизован как метод измерения внутренних напряжений.

Главной проблемой в применении метода является то, что акустическую анизотропию вызывают не только упругие деформации, но и исходная механическая анизотропия материала и, самое главное – пластические деформации. В реальных условиях большая часть деталей и узлов изготавливается с пластическими деформациями (прокат, прессование, сварка), поэтому при измерениях чистое упругое состояние материала невозможно получить. При измерениях необходимо разделить так называемое текстурирование (с ним связана часть акустической анизотропии, которая возникает в результате пластической деформации и механической анизотропии материала) и упругие напряжения, от которых величина акустической анизотропии зависит линейно. Как правило, для этого используются образцы - свидетели и пробное нагружение конструкции.

Были проведены измерения как в процессе деформации металлических образцов из стандартного алюминиевого проката, так и после их пластического деформирования. Полученные нами результаты показывают, что применяемые методы разделения пластических и упругих деформаций работают только в узком диапазоне небольших пластических деформаций. Эти методы основаны на представлениях о линейной зависимости акустической анизотропии от величины пластических деформаций, которая была постулирована и экспериментально обоснована в работах Пао [1] на отожженных образцах из чистого алюминия. Образцы, вырезанные из проката, демонстрируют нелинейную немонотонную зависимость. При этом средняя величина вклада пластической деформации в величину акустической анизотропии значительно превосходит вклад от упругих напряжений.

Задача о распространении упругой поперечной и продольной волны в толстой плите рассмотрена нами в предположении о том, что материал плиты изотропный, упруго-пластический с упрочнением. Анализ задачи при одноосном нагружении плиты выше предела текучести показывает, что скорости поперечной волны и скорость продольной волны будут нелинейным образом зависеть от степени пластического деформирования, что подтверждается экспериментально.

Нами была также зафиксирована отчетливая пластическая волна, которая возникает в нагруженных образцах перед их разрушением. Толщина поперечного сечения образца меняется волнообразно, что хорошо коррелирует с изменением скорости распространения продольной и поперечной упругих волн.

Экспериментально и путем моделирования показано, что при значительных пластических деформациях существует сильная нелинейная зависимость акустической анизотропии от степени пластической деформации.

Синхронное изменение абсолютных значений скоростей продольной и поперечной звуковых волн позволяет определить степень влияния пластической деформации на акустическую анизотропию при анализе напряженно деформированного состояния узлов и деталей машин и конструкций.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского Научного Фонда (Соглашение № 15-19-00091).

Литература

1. Hirao M., Pao Y. H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam //The Journal of the Acoustical Society of America. 1985. Т. 77. №. 5. С. 1659–1664.

ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ РЕЗИН С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ АГРЕССИВО- И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Соколова М.Д., Дьяконов А.А., Шадринов Н.В.

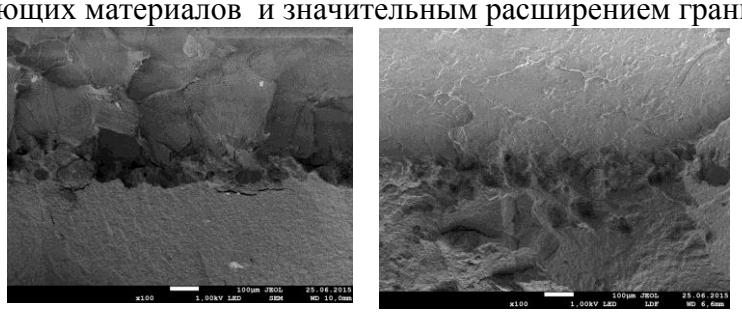
ФГБУН ИПНГ СО РАН, д. 20, ул. Автодорожная, г. Якутск, 677007, Российская Федерация
ФГАОУ ВПО СВФУ им. М.К. Аммосова, д. 58, ул. Белинского, г. Якутск, 677000, Российская Федерация
e-mail: marsokol@mail.ru, afonya71185@mail.ru, nshadrinoff@yandex.ru

В настоящее время в промышленности применяются различные резино-технические изделия РТИ (шины, конвейерные ленты, шланги, рукава, уплотнения и т.д.). В зонах с холодным климатом при их эксплуатации возникает опасность при низких температурах потери главного и отличительного свойства резин – высокой эластичности. Резины, применяющиеся для изготовления шин, конвейерных лент и многих других РТИ, в своей основе имеют неполярные каучуки, которые обладают достаточно удовлетворительной морозостойкостью (до – 55 ^{o}C и ниже). Основные проблемы возникают у изделий, которые работают в углеводородных средах (масла, смазки, нефтепродукты). Они изготавливаются на основе полярных каучуков и имеют низкую морозостойкость.

Приоритетным направлением экономического развития многих стран является промышленное освоение арктических зон. В связи с этим требования к материалам становятся еще более жесткими, как по эксплуатационным показателям, так и по морозостойкости (до минус 60 ^{o}C и ниже). Одним из путей решения проблемы сочетания в одном эластомерном материале, как высокой морозостойкости, так и высокого уровня эксплуатационных свойств (прочности, износостойкости, стойкости к рабочим средам) является применения в качестве модификаторов термопластов, которые вводятся в объем материала. Однако в этом случае значительно улучшить износо- и агрессивостойкость не удается. В то же время эти свойства определяются в первую очередь свойствами поверхности.

В представляемой работе приведены результаты исследований по разработке способов нанесения защитного покрытия из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) на образцы, изготовленные из резиновых смесей на основе полярного бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18, неполярных каучуков - изопренового каучука СКИ-3 и бутадиенового каучука СКД-2. Исследования стойкости материалов в стандартной углеводородной жидкости IRM 903 показал, что степень набухания СВМПЭ меньше по сравнению с этим показателям для резин на основе БНКС в 3 раза, резин на основе СКИ-3 в 23 раза, резин на основе СКД-2 в 26 раз. Объемный износ при абразивном истирании СВМПЭ меньше более чем в 200 раз по сравнению с эластомерными материалами.

Основным показателем надежной работы таких изделий является обеспечение прочной связи покрытия с основой (подложкой). В данной работе эта проблема решена путем введения в объем эластомерной матрицы порошка СВМПЭ, который является также материалов покрытия. Такой подход позволил повысить прочность связи между покрытием и резиной на 20-25% благодаря формированию границы раздела с взаимопроникновением контактирующих материалов и значительным расширением граничного слоя (рис.1).



а б

Рис. 1. Микрофотографии границы между слоями резины и СВМПЭ: а – обычная технология; б - разработанная технология.

НАПРЯЖЕНИЯ В ПЛОСКИХ ОБРАЗЦАХ СВИДЕТЕЛЯХ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Стружанов В.В.

ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: stru@imach.uran.ru

Основная проблема при диагностике контроле заключается в том, что непосредственному измерению поддаётся только ограниченный набор физических параметров, на величину которых остальные (неизмеряемые) параметры оказывают лишь опосредованное влияние. Таким образом, возникают задачи определения неизмеряемых величин по результатам их проявлений, которые можно зафиксировать в эксперименте.

Одной из распространённых технологических операций является дробеструйный наклёп, в результате которого в поверхностных слоях изделия возникают сжимающие напряжения. Измерение остаточных напряжений, как правило, связано с разрушающими методами. Однако, в подавляющем числе случаев это невозможно, т.к. уничтожается уже и само изделие. Дробеструйный наклёп применяется, например, для упрочнения лопастей вертолётов. Оценка качества упрочнения осуществляется с помощью образцов-свидетелей. Это достаточно плоские пластины с прямоугольным поперечным сечением. Они крепятся к лопасти и тоже подергаются дробеструйному наклёпу. После их снятия измеряется прогиб и на основании эмпирических данных судят об эффективности процесса. Однако уровень остаточных сжимающих напряжений остаётся неизвестным.

В данной работе представлено решение некорректной задачи по расчёту остаточных сжимающих напряжений в образцах свидетелях после поверхностного упрочнения. Получены уравнения, позволяющие рассчитать напряжения по результатам измерения прогиба пластины после поверхностного упрочнения.

СЖАТИЕ ДВУХСЛОЙНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА

Стружанов В.В.

ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: stru@imach.uran.ru

Для проектирования технологии процесса прокатки многослойных материалов и предсказания свойств получаемых изделий необходимо, по крайней мере на качественном уровне, иметь представление о напряжённо-деформированном состоянии в слоях при их совместном упругопластическом деформировании в условиях одноосного сжатия. Это позволит выяснить принципиальную возможность осуществления процесса, подобрать материал и оценить качество пакета после его прокатки. В данной работе излагается решение задачи об определении напряжений и деформаций в двухслойном прямоугольном параллелепипеде при его сжатии при условии аддитивности деформаций. Параллелепипед состоит из двух равных по размеру слоёв с площадью поперечного сечения, равной единице. Свойства слоёв существенно различны и характеризуются кусочно-линейными зависимостями напряжений от деформаций при одноосном сжатии материалов слоёв. Параллелепипед расположен между двух абсолютно жёстких плит. Нижняя плита неподвижна, а верхняя перемещается вниз. Трением между плитами и слоями пренебрегаем. Получены выражения дл напряжений и деформаций на упругой и упругопластической стадиях деформирования. Установлено, что оба слоя могут перейти в пластичность только при достаточной близости их свойств. Данные результаты в первом приближении позволяют на стадии проектирования процесса прокатки многослойных полос предсказать осуществимость этой технологии для существенно разнородных материалов и бездефектность получаемой продукции.

FORECASTING PARAMETRIC RESONANCE OSCILLATIONS OF TRANSMISSION FRICTION DISCS ON THE BASIS OF HIGH PRECISION DETERMINATION OF THEIR MODAL CHARACTERISTICS

Derzhanskii V., Taratorkin A., Taratorkin I.

Institute of Engineering Science of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS), 34 Komsomolskaya st., 620049, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: dvb_47@mail.ru, ig_tar@mail.ru, alexandr_tar@mail.ru

Index terms: disk, friction, parametric resonance, filtering

Research and/or Engineering Questions/Objective. Testing experimental models of vehicles with hydromechanical transmissions speaks for high dynamic loading, limiting durability of metal ceramic disks of frictional control elements and components joined with them. The paper considers a new kind of breakdown, disk disruption, which is observed in transmissions under development and in designs of the world leaders. It has been established that the same type of disruption is observed in the transport vehicles equipped with stepped ration gear transmissions and diesel engines. The hypothesis is made for agitating resonant oscillations in disks with the nonlinear elastic characteristic of their interaction with a driving drum. The research objective consists in studying dynamic loading formation and providing a rationale for the methods of increasing durability of frictional elements of transport vehicle transmissions.

Methodology. Parametrical resonance stability research is conducted on the basis of a mathematical model of the highly nonlinear system of differential equations. The nonlinear function of the moment due to angular displacement regarding the drum is defined experimentally. On the basis of simulation modeling of system dynamics, the disturbing frequency spectrum formed by nonlinearity is defined. The stability analysis and methods of increasing durability is conducted according to the Ince-Strutt diagram and Mathieu equation.

Results. The work confirms the hypothesis for disk disruption due to agitating parametrical resonances generated by hydrodynamic processes in the torque converter and due to working liquid pressure oscillation in charge circuit system, and, besides, due to the periodic component of the engine moment. The developed method of durability increase on the basis of providing stability of the nonlinear system, and correcting the range of natural frequency spectrum of disks is to be implemented.

What does the paper offer that is new in the field including in comparison to other work by the authors? The scientific novelty of the research consists in studying the consistant pattern of generation and provision of a rationale for eliminating resonant modes in terms of studying the dynamics of the highly nonlinear system with polyharmonic disturbances formed by the diesel engine, by hydrodynamic processes in the blade-to-blade space of the torque converter, as well as by the working liquid pressure oscillation in the charge circuit system.

At the same time the admitting generality of the obtained theoretical and experimental results, the main limitation of this study is an insufficient scope of experimental validation of hybrid and electromechanical transmissions

Conclusions. New results dealing with dynamic disk loading are the basis for developing the existing technique of design calculation, which is distinguished from the known ones by taking into consideration probability of parametrical resonant oscillations occurrence.

The paper presents the findings of the investigation of initiation conditions for parametric resonances in the nonlinear system “Engine unit – Torque Converter – Planetary Transmission Elements (Drum and Lined Plate)”. The mentioned oscillations and resonances form dynamic loading of powertrain lined plates. In terms of the research results the paper validates the ways of tuning parametric oscillations. These ways provide for the increasing of durability of multiplate clutches plates of vehicle powertrain. The evaluation of dynamic stability was performed on the basis of the analysis of Mathieu equation and Ince-Strutt diagram.

Presented a new method for accurately determining the modal characteristics of the friction discs. The restriction of modulation depth parameter is proposed by filtering of high-frequency disturbances which are generated in the nonlinear system by different oscillation sources (power unit - internal combustion engine (ICE) or electric motor (EM), hydrodynamic processes in the hydraulic transformer – torque converter or hydraulic coupling, oil supply pump). The efficiency evaluation of the influence of the developed actions on lined plate’s durability was performed.

ПОСТРОЕНИЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА И ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Столбова О.С.

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

Сплавы с памятью формы (СПФ), благодаря ряду уникальных свойств и явлений находят широкое применение в технике и медицине. Фазовые переходы в СПФ вызваны перестройкой атомно-кристаллической решетки, происходящей в определенном температурном интервале. При охлаждении происходит прямой переход из высокосимметричной аустенитной фазы в мартенситную, кристаллическая решетка которой обладает существенно меньшей степенью симметрии. В процессе обратного перехода при нагреве мартенсит превращается в аустенит, фазовая деформация исчезает, и происходит восстановление первоначальной формы образца (эффект памяти формы), таким образом, фазовые деформации СПФ являются обратимыми. Наличие необратимой пластической деформации, как показано в ряде экспериментов, оказывает влияние на характеристики фазового перехода: изменяются характерные температуры превращения, а также величина максимально возможной обратимой фазовой деформации.

При построении определяющего уравнения для малых деформаций предполагается аддитивность упругих, температурных, фазовых и пластических деформаций. Для температурных деформаций задаётся закон изотропного расширения, для фазовых записываются соотношения, предложенные в работах А.А. Мовчана, для пластических – закон пластического течения с изотропным упрочнением. Учитывается изменение модулей упругости материала в процессе прямого (аустенит-мартенсит) и обратного (мартенсит- аустенит) фазовых переходов. Учитывается зависимость характерных температур фазовых переходов от напряжений, возникающих в теле, и накопленной пластической деформации.

Полученное определяющее соотношение обобщено на случай конечных деформаций с помощью формализованного подхода, предложенного в работах А.А. Рогового, позволяющего получать кинематические и определяющие уравнения, удовлетворяющие принципам термодинамики и объективности. Полный градиент места записывается в виде произведения упругого, температурного, фазового и пластического градиентов. Вводятся три конфигурации: начальная, текущая и промежуточная, близкая к текущей. Кинематические уравнения и определяющее соотношение представляются в линеаризованном виде относительно промежуточной конфигурации.

Для верификации полученных уравнений решается модельная задача с однородными полями напряжений и деформаций. Рассматривается образец из СПФ (никелид титана) в форме стержня. В аустенитном состоянии образец растягивается вдоль его оси, при этом в материале возникают упругие и пластические (при превышении предела текучести) деформации. Затем происходит прямой фазовый переход аустенит-мартенсит при охлаждении, что приводит к накоплению фазовых деформаций. После этого стержень нагревается, в результате чего материал возвращается в аустенитное состояние при обратном фазовом переходе мартенсит-аустенит, обратимые фазовые деформации исчезаю, а необратимые пластические остаются. При решении задачи учитываются также деформации, возникающие за счет температурного расширения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-31-00161).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ В ФЕРРОМАГНИТНОМ СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Роговой А.А., Столбова О.С.

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

В рамках конечных деформаций построена модель, позволяющая описывать процесс управления прямым (аустенит-мартенсит) и обратным (мартенсит-аустенит) фазовыми переходами в ферромагнитных поликристаллических материалах с памятью формы (сплавы Гейслера) при действии внешних силовых, тепловых и магнитных полей. Управление фазовым переходом осуществляется с помощью магнитного поля, которое изменяет (сдвигает) характерные температуры фазовых переходов.

Представлены кинематические и определяющие уравнения, удовлетворяющие принципам термодинамики и объективности, как для мартенситной и аустенитной фаз, так и для смешанного аустенитно-мартенситного состояния, которое имеет место в процессе размытого фазового перехода первого рода. Получены соотношения, описывающие сдвиг характерных температур фазовых переходов в соответствии с обобщенным законом Клаузиуса-Клапейрона. Этот сдвиг определяется напряжениями, фазовыми деформациями и латентным теплом, сопровождающими процесс фазового перехода, и управляется внутренним магнитным полем, индуцированным в материале внешним магнитным полем. Для определения латентного тепла предложено выражение для свободной энергии Гельмгольца и из неравенства Клаузиуса-Дюгема получено выражение для энтропии, изменение которой при приложении внешнего магнитного поля позволило описать магнитокалорический эффект.

Внутреннее магнитное поле приводит также к возникновению в теле массовых (пондеромоторных) и поверхностных силы в дополнение к обычным внешним силам. Деформация тела под влиянием всех этих сил приводит к изменению внешнего магнитного поля. Для решения этой связанной магнитомеханической задачи использованы два связанных вариационных уравнения: уравнение Лагранжа, соответствующее большим деформациям, и уравнение, соответствующее слабой постановке задачи о поведении намагничивающегося тела конечных размеров во внешнем магнитном поле.

Верификация полученных соотношений выполнена численно (методом конечных элементов) на задаче, имеющей экспериментальное обеспечение. Исследован фазовый переход в образце из поликристаллического сплава Ni-Mn-Fe-Ga (ферромагнитный материал с памятью формы). В аустенитном состоянии прямая консольная балка нагружается изгибающей силой и переводится в мартенситное состояние через температурный интервал прямого фазового перехода. Затем нагрузка снимается, но балка остается в изогнутом состоянии за счет наведенных в ней фазовых деформаций. После этого включается магнитное поле, и балка нагревается до температуры, превышающей температуру окончания обратного фазового перехода при отсутствии магнитного поля, но меньшей температуры начала этого перехода в присутствии магнитного поля. Температура фиксируется, магнитное поле выключается, происходит обратный фазовый переход, и консольная балка возвращается в первоначальное недеформированное состояние. Магнитное поле в этой задаче управляло характеристической температурой обратного фазового перехода. Полученные при этом результаты находятся в хорошем соответствии с доступными экспериментальными данными, что позволяет заключить, что представленная в работе модель достаточно точно описывает изменение деформаций и магнитокалорический эффект в процессе фазового перехода в ферромагнитных сплавах с памятью формы при конечных деформациях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-01-00080).

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОНКОСТЕНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКИЙ ПУТЕМ ДЕМПФИРОВАНИЯ ПЕНОПЛАСТОМ

Миронов В.И., Полежаев Н.И.

ИМАШ УрО РАН, УрФУ

УрФУ: ул. Мира, д.19; г. Екатеринбург; 620002; Российская Федерация;

e-mail: visim.vm@mail.ru; apyff@mail.ru

Балки коробчатого сечения и тонкостенные стержни с сечением в виде замкнутого профиля исключительно широко используются в несущих металлических конструкциях транспортных машин и сооружений различного назначения. Использование наполнителя малой плотности типа пенопласта, при незначительном увеличении веса изделия, может существенно повысить защиту персонала от шума и вредных вибраций, а конструкцию от коррозии. Но основное назначение наполнителя, способного к интенсивному поглощению энергии колебаний, заключается в снижении их числа и амплитуды при динамических внешних воздействиях. Что приведет к повышению долговечности несущих конструкций машин и, как следствие, их экономической эффективности.

В строительной индустрии и в самолетостроении давно и успешно используются трехслойные пластины и оболочки. Известно выражение для коэффициента поглощения ψ_C трехслойного стержня с покрытием в условиях чистого изгиба

$$\psi_C = \psi + \psi_{\ddot{I}} \frac{6E_{\ddot{I}} V_{\ddot{I}}}{EV} \quad (1)$$

Где $\psi, \psi_{\ddot{I}}$ – коэффициенты поглощения стержня без покрытия и материала покрытия, $V, V_{\ddot{I}}$ è $E, E_{\ddot{I}}$ - объемы и модули упругости материала стержня и покрытия. Отмечается, что поправка на коэффициент поглощения стержня с покрытием, определяемая вторым слагаемым, зависит от произведения $\psi_{\ddot{I}} E_{\ddot{I}}$. Поэтому покрытия из низкомодульных материалов с хорошими поглощающими свойствами зачастую оказываются неэффективными.

Выражение (1) получено для стержня с тонким покрытием и поэтому соотношение объемов не принималось во внимание. Для тонкостенных сечений, например, пролетных балок мостовых кранов отношение $V_{\ddot{I}} / V$ будет существенным. Следовательно и демпфирующий эффект от наполнителя будет ощутимым, что снизит динамику крана в переходных режимах и во внештатных ситуациях.

Представляет интерес количественная оценка снижения амплитуды и числа значимых колебаний расчетных напряжений в стальной балке с наполнителем, прямо влияющих на ее усталостные свойства. Уместно предварить дорогостоящие натурные испытания пролетной балки численными экспериментами с балкой простой конструкции.

В докладе приводится и анализируется выражение для оценки коэффициента поглощения тонкостенной стальной балки прямоугольного сечения с наполнителем при изгибе, аналогичное по смыслу выражению (1). Кроме того, представлены результаты численных экспериментов, выполненных в среде APM WIN MACHINE для конкретной балки, предназначенной для проведения прямого эксперимента. По изменению частоты собственных колебаний конструкции сделана оценка логарифмического декремента колебаний. Приводятся результаты параметрического анализа демпфирующих свойств балки в зависимости от толщины стенки и свойств наполнителя.

ДИАГНОСТИКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Голиков Н.И., Сидоров М.М., Тихонов Р.П., Максимова Е.М.

ИФТПС СО РАН, д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Российская Федерация,
e-mail: n.i.golikov@mail.ru

Подземные магистральные газопроводы, прокладываемые в инженерно-геологических условиях Крайнего Севера, подвержены значительным пространственным перемещениям и находятся в сложном силовом взаимодействии с окружающими их грунтами. Процесс изменения проектного положения обусловлен сложным сочетанием эксплуатационных и инженерно-гидрогеологических факторов, воздействие которых носит случайный характер. Потеря устойчивости обуславливается наличием значительных сжимающих продольных сил, низкой удерживающей способностью обводненного грунта и недостаточной эффективностью мероприятий по закреплению газопровода на проектных отметках. Такие участки являются потенциально опасными и подвержены не только риску потери общей устойчивости, но и местной с превышением допустимого предела действующих в сечении трубы напряжений, что может привести к исчерпанию несущей способности.

В работе представлены результаты диагностирования открытого участка подводного перехода магистрального газопровода диаметром 530 мм через р. Лена, предназначенный для газификации заречных улусов Республики Саха (Якутия). Для проведения исследований напряженного состояния участка подводного перехода магистрального газопровода, применена разработанная в институте методика определения механических напряжений с помощью портативной рентгеновской аппаратуры (ПРОН) для стальных трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях отрицательных температур.

По результатам натурных измерений участка магистрального газопровода на поверхности труб обнаружены сжимающие действующие напряжения, величина которых составляет: для осевых напряжений от -148 и -201 МПа, кольцевых – от -147 до -253 МПа. Определено уравнение, описывающее пространственное положение исследуемого участка магистрального газопровода. Вычисленный максимальный прогиб трубопровода составляет 193 мм. Проведен анализ и теоретические расчеты напряженного состояния участка магистрального газопровода, даны рекомендации по его дальнейшей эксплуатации.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БАНДАЖЕЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДОМ НИЗКОЧАСТОТНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Алексиев А.Р.[1], Масючок О.П.[2], Бухаров С.Н.[3]

[1]*Институт механики – БАН, д. 4, ул. Акад. Г. Бончев, г. София 1113, Болгария, e-mail: AL68@abv.bg*
[2]*Институт электросварки им. Е.О.Патона – НАНУ, д. 11, ул. К. Малевича, г. Киев 03680, Украина, e-mail: masyuchock@bigmir.net*
[3]*Институт механики металлополимерных систем-НАНБ, д. 32а, ул. Кирова, г. Гомель 246050, Беларусь, e-mail: sbuharov@tut.by*

Исследованы композитные материалы на основе эпоксидных смол с различными наполнителями, предназначенные для изготовления бандажей при ремонте крупных коррозионных повреждений магистральных нефте- и газопроводов, без вывода их из эксплуатации. В качестве армирующего материала использованы как ткань из углеродных нитей, так и стеклоткань. Для определения влияния степени адгезии смолы с тканей, часть ткани обработана вакуумным напылением политетрафторэтиленом.

В работе описано применение низкочастотного резонансного метода для определения механических характеристик материала образцов: динамический модуль упругости Юнга и внутреннее трение. Образцы были изготовлены в виде стержней прямоугольного сечения, на которые были наклеены тонкие пластины из ферромагнитной низкоуглеродистой стали такого же размера. Такой составной образец размещали на опорах, которые располагались на расстоянии 0,22 от длины образца с обоих концов образца. Концы образца в процессе эксперимента оставались свободными. В образцах при помощи электромагнитного преобразователя возбуждали механические колебания. Меняя частоту задающего звукового генератора, добивались установления в образце резонансных колебаний, что определяли по максимальной амплитуде сигнала в приемном электромагнитном преобразователе. В процессе измерения регистрировали первую (самую низкую) резонансную частоту. При этом на те места образца, которыми он контактировал с опорами, приходились узлы колебаний. Регистрировали также частоты, при которых сигнал в приемном электромагнитном преобразователе был равен 0,7 от максимального значения.

Зная динамический модуль упругости и коэффициент внутреннего трения стальной пластинки, а также геометрические размеры, плотность и частоты колебаний составного образца, по известным формулам рассчитывали динамический модуль упругости и коэффициент внутреннего трения композитного материала.

Результаты приведенных исследований согласуются с результатами ультразвуковых исследований и микроиндентирования, полученными авторами ранее.

COMPARATIVE MEASUREMENTS OF THE STEEL DEFORMATION DURING THE TENSILE USING ULTRASONIC METHOD AND MAGNETIC BARKHAUSEN NOISE

Ivanova Y.[1,4], Partalin T.[2], Povolotskaya A.[3]

[1]*Sofia University, Faculty of Physics, 5 James Bourchier blvd, Sofia, 1164, Bulgaria, e-mail: yonivan@phys.uni-sofia.bg*

[2]*Sofia University, Faculty of Mathematics and Informatics, 5 James Bourchier blvd, Sofia, 1164, Bulgaria, e-mail: topart@fmi.uni-sofia.bg*

[3]*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the RAS, 34, Komsomolskaya str., Ekaterinburg, Russia, e-mail: us@imach.uran.ru*

[4]*Institute of Mechanics-BAS, bl. 4, Ac. G. Bonchev str., Sofia, 1113, Bulgaria, e-mail: yonka@imbm.bas.bg*

The nondestructive monitoring of the deformation during the tensile by three methods based on different physical effects is presented.

Ultrasonic method, Magnetic and Acoustic Barkhausen Noise were used for the investigation. The comparative investigations provided better reliability of the stress evaluation.

The purpose of this paper was to register and analyze the dependence between microstructure, mechanical and acoustic and magnetic properties and to find appropriate parameters for stress state evaluation.

Ultrasonic Rayleigh waves (URW) velocity, magnetonoise and magnetoacoustic emission parameters, obtained by on-line and off-line measurements were used for stress state identification. The off-line measurements were carried out on the specimens after different degree of plastic deformation. The on-line measurements were performed on the steel specimens during the tensile testing.

Off-line and in-process non-destructive measurements were performed and the following results were obtained:

– Dependences of ultrasonic parameter (time of flight) on the applied stress are obtained by on-line ultrasonic measurement. In the elastic region ultrasonic parameter is linearly proportional to the applied stress. However in the plastic region its variation can be described by power low dependence.

– Magnetic noise parameter decreases in the elastic region and increases in the plastic region. This effect is explained by change the magnetic structure of the steels during plastic deformation.

– Relative change of ultrasonic velocity and magnetic acoustic noise obtained by off-line ultrasonic measurement decreases with increasing the plastic strain.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ TiNiHfCu-hNB-Co

Русинов П.О., Бледнова Ж.М., Балаев Э.Ю.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», д. 2, ул. Московская, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация, e-mail: ruspiter5@mail.ru, blednova@mail.ru

Цель работы. Исследование структурно-морфологических особенностей, фазовых превращений и выработка рекомендаций по оптимизации структуры, фазового состава, архитектуры и свойств композиции для увеличения жизненного цикла изделий.

Полный цикл формирования композитного поверхностного слоя включает следующие операции: очистку и подготовку поверхности; механическую активацию (МА) наносимого материала; высокоскоростное газопламенное напыление в защитной атмосфере (ВГН); нанесение функционального слоя TiNiZr, обладающего ЭПФ, нанесение функционального износостойкого слоя cNB-Co; термическую (ТО) и термомеханическую обработку (ТМО). В процессе формирования композита вдоль всей границы раздела сталь – TiNiZr обеспечено хорошее соединение – без пор и несплошностей (рис.1). Вблизи границ раздела наблюдаются зоны перемешивания, образование которых, по-видимому, связано с процессами локального расплавления при напылении механоактивированных порошков за счет выделения энергии, накопленной в процессе МА и последующей его кристаллизации. Толщина функционального слоя TiNiZr составляет 950-1000 мкм, износостойкого слоя cNB-Co 500-550 мкм.

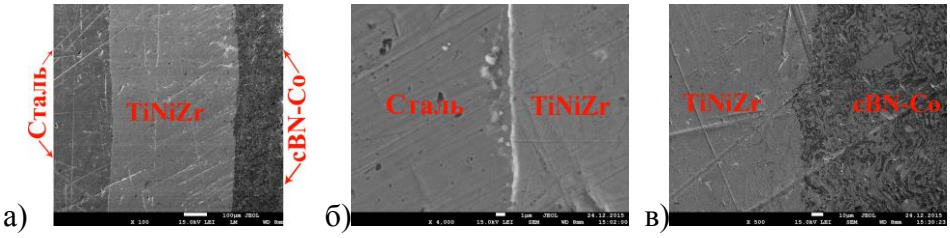


Рис.1. Структура многослойных композитных поверхностных слоев сталь 45 - TiNiZr-cNB-Co – а); структура сталь 45 - TiNiZr × 4000; структура TiNiZr-cNB-Co - в)

Испытания образцов (сталь 45+ TiNiZr-cNB-Co) на многоцикловую усталость при изгибе с вращением показали повышение предела выносливости на 41,7% (σ_{-1} стали 45 без покрытия составил 275 МПа, а после ПМ сплавами TiNiZr-cNB-Co – 472 МПа). Повышение износостойкости стали 45 с поверхностными слоями с ЭПФ TiNiZr-cNB-Co составляет 5,8 раза по сравнению со сталью.

Рассмотрена градиентная поверхностная композиция TiNiZr-cNB-Co и технология ее формирования для работы в экстремальных условиях эксплуатации, обеспечивающая повышенные эксплуатационные свойства в процессе жизненного цикла изделий. На основе комплекса проведенных экспериментальных исследований установлено, что поверхностная композиция TiNiZr-cNB-Co, имеет более прочную по сравнению с однослойным покрытием адгезионную связь с основой, (110 – 120 МПа). Полученные результаты структурных исследований и механических испытания образцов с композитным многофункциональным поверхностным слоем TiNiZr-cNB-Co свидетельствуют о том, что прочность полученных композитов и их функциональные свойства превышает свойства основы. Показано, что повышение износоусталостных характеристик многослойной композиции объясняется большей энергопоглощаемостью многослойных покрытий, уменьшением скорости распространения микротрещин в слоях, имеющих градиент по фазовому составу и толщине слоев, лучшей адгезией покрытия с основой и сверхэластичностью слоев из материалов с ЭПФ в соответствующем структурно-фазовом состоянии.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (Соглашение № 15-19-00202).

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В МОНОЛИТНЫХ И СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Гладковский С.В., Владимиров А.П., Горкунов Э.С., Каманцев И.С., Веселова В.Е., Друкаренко Н.А.

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

В работе представлены результаты исследований, связанных с оценкой возможности использования неразрушающих физических методов контроля для изучения процесса усталостного разрушения конструкционных монолитных и слоистых материалов на металлической основе. Материалом исследования являлись малоуглеродистые стали 09Г2С, 12ГБА, ЭП678 и слоистые композиты на их основе, а также деформационно-метастабильные Fe-Cr-Ni и Fe-Mn стали с аустенитной и двухфазной (ϒ+ ε) структурой. Образование в сталях с метастабильным аустенитом в зоне пластической деформации в вершине усталостной трещины ферромагнитного α'-мартенсита позволило эффективно использовать возможности применения магнитных методов контроля. Циклическое нагружение образцов по схеме трехточечного изгиба и внецентренного растяжения осуществлялось на высокочастотной испытательной машине MIKROTRON (RUMUL) при частотах нагружения f = 100Гц. Изучение процессов накопления усталостной поврежденности и оценка параметров циклической трещиностойкости исследованных материалов по сопутствующим образованию усталостной макротрещины изменениям физических характеристик и эволюции поверхности образца в пределах локализованной зоны пластической деформации (ЛЗПД) проведено с использованием комплекса современных неразрушающих методов контроля: магнитный и тепловизионный контроль, оптическая профилометрия и лазерная динамическая спекл-интерферометрия. Применение указанных методов неразрушающего контроля в сочетании с фотофиксацией длины усталостной трещины и регистрацией резонансной частоты нагружения позволило достоверно оценивать стадии накопления критической поврежденности, момент появления усталостной трещины и кинетику ее роста.

При изучении процессов зарождения и роста усталостной трещины в слоистых композиционных материалах (от 3 до 11 слоев) с использованием комплекса физических методов контроля проведено исследование процессов усталости и определено влияние конструкции композита (толщина и характер чередования слоев) на особенности кинетики роста усталостных трещин. На модельном биметалле 09Г2С-09Г2С, полученном сваркой взрывом, выявлена роль межслойной границы на эволюцию формы ЛЗПД в вершине усталостной трещины. На примере многослойных композитов «09Г2С-АД1» и «09Г2С-ЭП678» изучены особенности кинетики роста усталостной трещины, связанные с ее прохождением через границу слоев. Было установлено, что при переходе трещины из более прочного стального слоя в вязкий алюминиевый слой скорость ее распространения возрастает и разрушение приобретает квазистатический характер. Однако при последующем обратном переходе из вязкого слоя в более прочный скорость роста трещины резко снижается. Выявленная особенность развития усталостной трещины в слоистом материале связана с отсутствием в новом стальном слое композита инициирующего рост трещины концентратора напряжений, на формирование которого требуется дополнительное количество циклов нагружения.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 01201375904 при частичной поддержке грантов РФФИ № 16-08-01077, №16-38-00723_мол_а и проекта УрО РАН № 15-15-1-52.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ МНОГООСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Белоногов Н.С., Вильдеман В.Э.

Центр экспериментальной механики ПНИПУ, д.15, корп. Д, ауд. 104, ул. Академика Королева, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: cem.belonogov@gmail.com

Требования, предъявляемые к современным ответственным конструкциям, предполагают исследование характеристик сопротивления усталости в многоцикловой области. Известно, что долговечность конструкции сильно зависит от типа напряженно-деформированного состояния, реализуемого в объемах материала [1]. Таким образом, актуальным является анализ долговечности материалов в условиях, приближенных к условиям работы реальных конструкций, а именно при многоосном циклическом нагружении.

Настоящая работа посвящена исследованию усталостной долговечности алюминиевого сплава при совместном действии двух мод циклических и статических нагрузок. В рамках исследования проведены механические испытания корсетных образцов алюминиевого сплава Д16Т на циклическое растяжение/сжатие при действии постоянного кручения и на циклическое кручение при действии постоянного растяжения. В каждом случае испытания проводились на двух уровнях амплитуд циклических нагрузок с постепенным возрастанием величины постоянной нагрузки. Исследование проводилось на универсальной электродинамической системе с контролем по напряжениям [2]. В процессе испытаний регистрировалось количество циклов до разрушения образца, либо до появления макротрещины на его поверхности.

В результате полученных данных были построены 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 нагрузки снижается, и зависимости приобретают более линейный характер. При меньшей амплитуде циклического кручения отмечается существенное снижение долговечности материала на начальном участке диаграммы при малом увеличении постоянной составляющей нагрузки, направленной нормально к оси образца.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №16-01-00239.

Литература

1. 1.Усталость материалов и элементов конструкций. Избр. тр.: в 3 т. Т. 2 / Серенсен С.В. – Киев: Наук. думка. 198,. 256.
2. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований / В. Э. Вильдеман [и др.]. Под ред. В. Э. Вильдемана. ПНИПУ. 2011, 204.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ, ДЛЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Коноваленко Иг.С., Псахье С.Г.

Институт физики прочности и материаловедения (ИФПМ СО РАН),
д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация
e-mail: igkon@ispms.ru

В рамках метода подвижных клеточных автоматов разработана модель механического поведения композиционного материала (хрупкая матрица-пластичные включения) с градиентом пористости для теоретического исследования его упругих и прочностных свойств при сдвиговом нагружении. В модели реализована возможность задания произвольного закона распределения локальной пористости по глубине материала (для примера рассмотрен линейный закон), величины градиента пористости, степени заполнения порового пространства включениями, а также возможность задания свойств компонентов и параметров их механического взаимодействия (адгезионной прочности границ раздела). Предварительные тестовые расчеты выявили наличие нелинейных зависимостей прочностных, упругих и диссипативных свойств материала и его разрушения от перечисленных структурных параметров. Проведение расчетов для большего числа значений перечисленных структурных параметров и в более широком диапазоне их изменения откроет возможность детального качественного и количественного изучения взаимосвязи структуры и свойств данного класса материалов. Построенная модель может быть использована как для получения новых материалов с заданным сочетанием структуры и механических свойств, так и для оптимизации структуры уже существующих.

Работа выполнена в рамках Проекта № III.23.2.5 Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЕ КОНСОЛЬНОЙ БАЛКИ С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ

Бажуков П.С., Вильдеман В.Э.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, д.15, ул. Академика Королева, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: 9641979675cem@gmail.com, wildemann@pstu.ru

Для обеспечения живучести конструкций актуальным является исследование закономерностей роста дефектов в них, в частности, трещин. Экспериментальные исследования характеристик роста трещин в твердых телах связаны с рядом технических трудностей.

Важным представляется изучение влияния различных факторов на характер роста трещин, в частности, на условия перехода от равновесного роста дефекта к динамическому разрушению. В работе рассматривается моделирования влияние жесткости упругого поддерживающего элемента на равновесный рост трещин. Производилось одноосное нагружение консольной балки с концентратором напряжений рядом с местом крепления и моделирования прорастания трещины в ней. Моделирование нагружения проводилось до тех пор, пока трещина не переходила от равновесного роста к динамическому разрушению.

На основе полученных закономерностей можно сделать вывод, что жесткость поддерживающего упругого элемента системы оказывает значительное влияние на равновесный рост трещины в теле, что отражается в большем значении величины раскрытия трещины к моменту разрушения при повышении жесткости поддерживающего элемента.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00069) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

1. Керштейн И.М., Клюшников В.Д., Ломакин Е.В., Шестериков С.А. Основы экспериментальной механики разрушения. /– М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1989. – 140с.
2. Чаусов Н.Г. Полная диаграмма деформирования, как источник информации о кинетике накопления повреждений и трещиностойкости материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. –Т. 70, № 7. – С. 42–49.
3. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Проблемы машиностроения и прочности машин – 2013. – № 2. – С. 93–98.
4. Соколкин Ю.В., Вильдеман В.Э., Зайцев А.В., Рочев И.Н. Накопление структурных повреждений и устойчивое закритическое деформирование композиционных материалов // Механика композиционных материалов – 1998 – Т.34. №.2. – С.234–250.

ВЛИЯНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ НА ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАНОСТРУКТУРНОМ СПЛАВЕ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ УСТАЛОСТИ

Емалетдинов А.К., Галактионова А.В.

Уфимский государственный авиационный технический университет, д.12, ул. К. Маркса, г. Уфа, 450000, Российская Федерация, e-mail: emaletd@mail.ru

Эволюция вакансионной системы и зарождение пор под действием циклической термомеханической нагрузки определяют долговечность наноструктурных двухфазных сплавов, например жаропрочных сплавов, представляющих собой композиционные материалы, состоящие из кубических зерен размером до 0,5 мкм и соединенных тонкими прослойками толщиной до 0,05мкм. Рассмотрена задача кинетики вакансий при термомеханическом нагружении, включающем циклические напряжения растяжения, температурные напряжения и нагрев до высоких температур. В процессе нагружения возникает избыточная неоднородная неравновесная концентрация вакансий. В условиях непрерывного изменения температуры развиваются напряжения, возникающие вследствие разницы коэффициентов термического расширения фаз. Кинетика вакансий определяется диффузионным уравнением с источником вакансий по термактивационному механизму с учетом диффузионных и термических напряжений, а также концентрации напряжений возле включений. Парциальные коэффициенты диффузии компонентов различны, что приводит к возникновению потоков вакансий в зернах и прослойках. Потоки вакансий возникают под влиянием неоднородных рабочих напряжений и температур сплава. Рассмотрены соотношения для парциального коэффициента диффузии компонентов. Записаны система уравнений для химического потенциала неравновесных вакансий в зернах и прослойке с учетом концентрации напряжений, а также граничные условия. Проанализировано характерное время жизни вакансий при циклическом термомеханическом нагружении. Сделаны оценки для времени жизни в зависимости от плотности дислокаций, пор, размера зерен. Проведены численные расчеты неоднородной концентрации вакансий в зернах интерметаллидов и никелевой прослойке при действии термомеханической нагрузки и различных значениях параметров. Рассмотрено влияние концентрационных и диффузионных напряжений при циклической термомеханической нагрузке на энергию образования вакансий и скорость их зарождения. Величина концентрационных напряжений зависит от размерного несоответствия атомов и модулей сжимаемости компонентов. Диффузионные напряжения возникают вследствие неравных встречных потоков атомов компонентов. Сделаны оценки возникающих дополнительных потоков вакансий, определяемых уменьшением энергии зарождения благодаря уменьшению модулей упругости и межатомной энергии связи при высоких температурных полях, собственной энергии дислокаций, границ зерен и концентрации напряжений. Рассмотрено уравнение для химического потенциала вакансий с учетом перечисленных выше параметров. Сделаны оценки скорости возрастания диффузионных потоков. Рассмотрены распределение и оценки циклических термоупругих напряжений в зерне и прослойке и связанные с этим дополнительные потоки вакансий. Проведены численные расчеты неоднородной концентрации вакансий в зернах интерметаллидов и никелевой прослойке. Рассмотрено нестационарное уравнение для химического потенциала и концентрации вакансий. Потоки неравновесной концентрации вакансий приводят к росту пор. Выполнены численные расчеты кинетики избыточной концентрации вакансий и потоков вакансий на поверхность поры с учетом при действии различных стоков и критического размера поры под действием термомеханических нагружений. Рассмотрена кинетика роста поры при поглощении избыточной неравновесной концентрации вакансий с учетом температурной зависимости коэффициента диффузии вакансий и упругих модулей сплава. Рассмотрено влияние зернограничной диффузии и поглощения дислокационной сетки на скорость роста поры, проведены численные расчеты.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО РАЗМЕРА ЗАРОЖДЕНИЯ ПОР В ЖАРОПРОЧНОМ НАНОСТРУКТУРНОМ СПЛАВЕ ПРИ ТЕРМОУСТАЛОСТИ

Емалетдинов А.К., Галактионова А.В.

Уфимский государственный авиационный технический университет, д. 12, ул. К. Маркса, г. Уфа, 450000, Российская Федерация, e-mail: emaletd@mail.ru

Современные никелевые жаропрочные сплавы являются многокомпонентными двухфазными наноструктурными композиционными материалами. Концентрация вакансий меняется в широких пределах в течение рабочего цикла двигателя, и после его остановки избыточная концентрация может приводить к зарождению пор. Избыточная концентрация вакансий определяется рабочей температурой, напряженным состоянием сплава, состоянием границ зерен и др. Периодические процессы зарождения и стекания избыточной концентрации вакансий будут определять кинетику зарождения и роста пор. Рассмотрена модель диффузионного зарождения и роста поры в никелевом жаропрочном сплаве при циклическом термомеханическом нагружении с учетом влияния температуры, термоупругих напряжений и упругих модулей сплава на энергию образования вакансий, на коэффициент диффузии и потоки вакансий. Проведено моделирование изменения критического размера образования поры под действием различных факторов. Записано термодинамическое условие гетерогенного зарождения поры с использованием свободной энергии системы, включающей вклад поверхностного натяжения свободной поверхности и межфазной границы, упругой энергии сетки дислокаций несоответствия, действия внутренних и внешних термоупругих напряжений, концентрации неравновесных вакансий, включений в границах, возникновения диффузионных потоков химических компонентов сплава. Выполнена термодинамическая оценка условий образования поры критического размера. Проведен анализ термодинамических условий образования поры критического размера с учетом влияния различных параметров. Проведен анализ критического размера пор с учетом влияния упругой энергии межфазной границы, дислокаций несоответствия, концентрации напряжений в никеле, температурных напряжений циклических напряжений. Показано, что критический размер поры существенно уменьшается при учете перечисленных выше энергетических воздействий. Выполнены численные расчеты критического размера поры при действии различных факторов. Рассмотрена задача кинетики вакансий при циклическом термомеханическом нагружении с учетом температурной зависимости коэффициента диффузии вакансий и упругих модулей сплава. В процессе циклической термомеханической нагрузки возникает избыточная неоднородная неравновесная концентрация вакансий, определяемая тепловыми, силовыми нагрузками, дислокационной структурой и диффузионными процессами потоков химических компонентов сплава, как в границах, так и в зернах интерметаллида, так и в никелевых прослойках. Проведен анализ критического размера пор с учетом влияния межфазной границы, сетки дислокаций несоответствия, концентрации напряжений в никеле, температурных напряжений и др. Показано, что критический размер поры существенно уменьшается при учете перечисленных выше энергетических воздействий. Выполнены численные расчеты критического размера поры при действии различных факторов. Рассмотрено влияние зернограничной диффузии и поглощения дислокационной сетки на скорость роста поры, проведены численные расчеты.

РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Спевак Л.Ф., Бабайлов Н.А.

ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация,
e-mail: lfs@imach.uran.ru, babailov@imach.uran.ru

Работа посвящена разработке алгоритмов решения нелинейных задач теплопроводности в телах из слоистых металлических композитов. Нелинейность рассматриваемых задач определяется зависимостью коэффициента теплопроводности слоев от температуры. Задача состояла в расчете на заданном промежутке времени температурных полей, удовлетворяющих уравнению теплопроводности

$$\rho c u_t = \operatorname{div}\left(\lambda(u)\operatorname{grad} u\right), \quad (1)$$

при заданных граничных условиях первого рода. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры принималась в виде линейной функцией, аппроксимирующей экспериментальные данные [1]. На границе между слоями металлических композитов предполагалась непрерывность температуры и ее производной по пространственной переменной.

Построены математические модели и алгоритмы решения поставленной задачи на основе метода граничных элементов для одномерных случаев распределения тепла [2], в том числе, в листовых и трубчатых металлоизделиях из слоистых композитов. Решение нелинейных задач параболического типа сводится к пошаговому итерационному решению задач эллиптического типа на основе подхода, предложенного в работах [3, 4].

Выполнен расчет распределения температуры по построенному алгоритму для случаев двух- и трехслойных металлических композитов, в частности: нержавеющая сталь – сталь 10 (20) и медь М00 – сталь 10 (20). Решение проводилось от начального момента времени до достижения установившегося состояния, которое во всех расчетах совпадало с точным решением уравнения (1) в стационарном случае.

Полученные результаты дают основания считать, что разработанные алгоритмы применимы для расчета температурных полей в более сложных изделиях из слоистых композитов.

Литература

1. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. М.: Атомиздат, 1968. 485 с.
2. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках. М.: Мир, 1984. 494 с.
3. A.L. Kazakov and L.F. Spevak, Numerical and analytical studies of a nonlinear parabolic equation with boundary conditions of a special form // Applied Mathematical Modelling. 2013. Vol. 37. Iss. 10–11, p.p. 6918–6928.
4. A.L. Kazakov, L.F. Spevak An analytical and numerical study of a nonlinear parabolic equation with degeneration for the cases of circular and spherical symmetry // Applied Mathematical Modelling. 2016. Vol. 40. Iss. 2. P. 1333–1343.

STATIONARY TWO DIMENSIONAL AND AXISYMMETRIC CONVECTION OF THE HIGHLY VISCOUS NEWTONIAN FLUID AT REALIZATION ON HEAT EXCHANGE BORDERS UNDER THE LAW OF NEWTON – RIKHMAN

Vlasova S.S., Prosviryakov E.Yu.

KNRTU named after Tupolev, 10, Karl Marks st., Kazan, 420111, Russia, e-mail: sveta040790@yandex.ru
IES UB RAS, 34, Komsomolskaya st., 620049, Ekaterinburg, Russia, e-mail: evgen_pros@mail.ru

Modeling of the highly viscous flows of the Newtonian incompressible fluids is carried with the use of Stokes's equations and the continuity added with the heat conductivity equation [1]. The linearization of Navier-Stokes equations is possible thanks to small Reynolds numbers [1] who play a role of small parameter at convective acceleration in the derivative of Lagrange. The characteristic of the classical linearization is using of one geometrical scale, which consists at reduction the equation to a dimensionless form. As a rule, fluid of flow occurs in areas for which it is impossible to use isotropic approach of geometry. First of all, it is necessary to refer large-scale flows to such rotation of fluid. In this case one of the characteristic sizes will have many smaller size in comparison with others. The use of several dimensionless geometrical groups leads to the multilarge-scale effects of speeds and tension arising at the fluid motion.

There is offered the class of exact solutions of Navier-Stokes equations for studying fluid flows in geometrically anisotropic channels which is fair also for Stokes's approach. Two dimensional and axisymmetric convection is considered. There is shown a connection between expressions for hydrodynamic fields in a class of linearly growing speeds by part of the coordinate. There is simply proved the equivalence of the allowing systems of the ordinary differential equations from which solutions coefficients of classes of exact solutions are calculated. Such functions, which playing a role of coefficients, depend on transverse coordinate. In this case fields of pressure and temperature are written in the square form comparative the horizontal coordinate (two dimensional convection) or a radial variable (axisymmetric) convection.

The majority of classical exact solutions are offered when there a condition of ideal heat exchange on borders are performing. This statement often narrows the area of applicability of decisions as even in laboratory conditions it is difficult to neglect the heat exchange with environment. There received expressions of the hydrodynamic fields in the contest of the class of solutions, which describe the thermal convection when there are performing Newton-Rikhman conditions on the lower or upper bound of a layer of fluid. There the estimates of decisions are given, which allow to claim about the existence of counter-current flows and inflection points of speeds in shear and axisymmetric flows in the highly viscous fluids. It is shown that there are modes at which of pressure and temperature accept extreme values in the fluid layer.

References

1. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M. Convective stability of incompressible liquid. Jerusalem: Wiley, Keter Press, 1976.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЁМКОСТИ И ПРОЧНОСТИ КЕРАМИКИ С РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Уваров С.В., Давыдова М.М., Чудинов В.В.

ИМСС УрО РАН, д. 1, ул. академика Королёва, г. Пермь, 614013, Российская Федерация.
e-mail: usv@icmm.ru

Целью данной работы является исследование прочностных свойств и энергоёмкости, т.е. способности поглощать механическую энергию в процессе разрушения, керамики из оксида циркония различной пористости. Керамика была предоставлена ИФПМ СО РАН, её свойства при квазистатическом нагружении представлены в [1]. Пористость керамических образцов варьировалась в диапазоне от 10 до 60 % по данным изготовителя. Образцы испытывались на сжатие на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского в диапазоне скоростей деформации от 500 до 3000 $с^{-1}$. Так как керамические образцы обладают высокой твёрдостью, стержни были оснащены накладками из карбида вольфрама, согласованными по импедансу со стержнями. Торцы керамических образцов шлифовались для обеспечения равномерности прилегания к накладкам и плоскопараллельности. Без принятия этих мер прочность образцов оказывалась заниженной в 2–3 раза из-за неоднородности напряжённого состояния. Между передающим стержнем и ударником помещался шейпер в виде пластинки из латуни для формирования колоколообразного нагружающего импульса.

Было обнаружено следующее: керамика с высокой пористостью (60 %), обладая меньшей прочностью, тем не менее показала более высокую диссипативную ёмкость 1,5–3 Дж/г. Тогда как керамика с 30 % пористости имела диссипативную ёмкость 0,8–1,9 Дж/г в зависимости от скорости нагружения. Также было обнаружено, что образцы из высокопористой керамики сохраняют несущую способность после первоначального разрушения, хотя и в меньшей степени. Это выражается в наличии второго участка линейного нарастания напряжения в ходе деформации с наклоном в три раза меньшим, чем на участке упругого нагружения. Прочность материала на втором участке составляет 40 % от начальной.

Работа выполнена при поддержке РНФ проект №14-19-01173.

Литература

1. E S Kalatur and A V Kozlova and S P Buyakova and S N Kulkov. Deformation behavior of zirconia-based porous ceramics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2013, Vol 47, №1, P 012004.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ОБОСНОВАННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛАХ

Плехов О.А., Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, д.1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация, e-mail: poa@icmm.ru

Процесс распространения усталостной трещины в металлах сопровождается формированием зоны монотонных и циклических пластических деформаций, в которых происходит интенсивная диссипация энергии. Использование коэффициента интенсивности напряжений для описания скорости роста усталостной трещины в законе Париса является следствием гипотезы о малости влияния пластической деформации на процесс её распространения. Эффективность данного закона и его активное использование в инженерной практике не снимает вопроса о поиске новых, физически обоснованных, закономерностей, учитывающих физику процессов, сопровождающих изменение структуры материала в зоне разрушения. Многими авторами были предложены альтернативные зависимости, связывающие скорость роста трещины и такие величины, как J-интеграл, работа пластической деформации, размер зоны пластической деформации, величина диссипированной энергии и т.д. Большинство работ носило феноменологический характер и использовало значительное число упрощений для описания процесса диссипации энергии. По-видимому, первое детальное описание баланса энергии в вершине трещины было сделано в [1]. В результате было получено кинетическое соотношение для скорости роста усталостной трещины. Верификация данного уравнения и его уточнение требует проведения детального экспериментального исследования процессов диссипации энергии в вершине трещины.

Развитие методов инфракрасной термографии позволило проводить бесконтактные измерения температуры на поверхности образца с высоким пространственным и временным разрешением [2]. Основной задачей при математической обработке результатов измерений с целью расчёта мощности источников тепла является корректный учёт условий теплообмена образца с окружающей средой и решения обратной задачи теплопроводности. Данная работа посвящена развитию экспериментальных методов исследования скорости диссипации энергии в вершине усталостной трещины в металлах. В качестве основных методов выбраны метод инфракрасной термографии, дополненный оригинальными алгоритмами обработки данных изменения температуры, и контактный метод регистрации потока тепла, использующий оригинальный датчик, работающий на основе эффекта Зеебека [3].

Проведена серия экспериментов на титановых сплавах и сталях при различных условиях циклического нагружения и различной геометрии исследуемых образцов. Анализ полученных результатов позволяет разделить процесс диссипации тепла в вершине распространяющейся трещины на два различных режима: первый – соответствует постоянному значению потока тепла при медленном росте трещины, второй – отражает возрастание потока тепла на заключительном этапе распространения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №14-01-96005 и №14-01-00122.

Литература

1. Short J. S., Hoeppner D. W. A Global/local theory of fatigue crack propagation // Engineering Fracture mechanics. –1989. – Vol. 33. – Is. 2. – P. 175–184.

2. Терехина А.И., Банников М.В., Плехов О.А., Плехова Э.В. Экспериментальное исследование генерации тепла в вершине усталостной трещины // ПЖТФ, 2012, том 38, выпуск 16, с. 9-15

3. Vshivkov A., Iziumova A., Plekhov O., Bär J. Experimental study of heat dissipation at the crack tip during fatigue crack propagation // Fracture and structural integrity 35 (2016) 131–137;

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В РЕЖИМАХ МНОГО- И ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПРИ КОНТАКТЕ С ЖИДКИМ ГАЛЛИЕМ

Банников М.В., Наймарк О.Б.

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

Механические свойства металлов существенно изменяются под влиянием окружающей среды. В целом эти изменения разнообразны и могут быть связаны как с химическим взаимодействием (коррозия), так и с физико-химическим влиянием среды. Во втором случае изменения свойств твердых тел, известные как эффект Ребиндера, связываются обычно с понижением удельной поверхностной энергии тела, в том числе и работы образования его новых поверхностей (трещин) в момент их возникновения. Отличительные особенности этого эффекта заключаются в том, что они наблюдаются только при совместном действии поверхностно-активной среды и напряженного состояния. Универсальность проявлений эффекта Ребиндера как обратимого (не коррозионного) влияния среды на механические свойства твердых тел и материалов при контакте с поверхностно-активными веществами (ПАВ) установлена для широкого класса материалов: металлов и неметаллов, аморфных и пористых материалов [1-4]. В работе приводится исследование влияния ПАВ - жидкого металла на усталостную прочность и долговечность металлов при нагружении в режимах многоцикловой и гигацикловой усталости [5]. Данные условия нагружения соответствуют режимам эксплуатации материалов в авиационной и автомобильной промышленности, в энергетической отрасли.

Исследуется адсорбционное понижение прочности чистого железа под действием жидкого эвтектоидного сплава на основе галлия при усталостном нагружении с разной частотой (20 Гц и 20 кГц). Анализ результатов испытаний образцов из армко-железа на воздухе и при контакте с жидким металлом позволяет сделать вывод о том, что для рассматриваемого материала на воздухе существует предполагаемый предел усталости на базе испытаний $3\cdot10^9$ при напряжении 160 МПа. Однако, при поверхностном контакте образца с тонким слоем жидкого галлия усталостная долговечность снижается более чем на 2 порядка $6\cdot10^6$ - $2{,}3\cdot10^7$ циклов до разрушения при частоте испытаний 20 кГц и до 4х порядков $4\cdot10^5$ при частоте испытаний 20 Гц. Такая значительная разница в усталостной долговечности может объясняться тем, что при высокой частоте испытаний жидкая фаза не успевает проникнуть в устье трещины и влияет только на механизм образования усталостной трещины, но механизм распространения остается традиционным. При низкой частоте испытаний жидкий металл успевает проникнуть в устье трещины и оказывает ослабляющее влияние сопротивлению роста трещины. Эффект Ребиндера кардинально изменяет механизм зарождения трещины при гигацикловом режиме нагружения, что приводит к образованию трещины с поверхности образца, а не в объеме материала, что характерно для такого режима усталостного разрушения на воздухе.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-08-08921, 16-41-590892 р_а, 16-48-590534 р_а.

Литература

1. Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. О влиянии изменений поверхностной энергии на спайность, твердость и другие свойства кристаллов // Сб. VI Съезд русских физиков. М., 1928. С. 29.2. Коллоидн. ж. 1958. 20. С. 645.
2. Шевеля В.В., Костецкий Б.И. Влияние поверхностноактивных сред на формирование дислокационной структуры при усталости металлов // доклады академии наук, 1967, т. 175, №6, 1270–1272
3. Lynch SP. Effect of environment on fracture – mechanisms of liquid–metal embrittlement, stress-corrosion cracking and corrosion-fatigue. // Int Conf Fract 1977;1:859–66.
4. Е.Д. Щукин Влияние активной среды на механичкскую устойчивость и повреждаемость поверхности твердого тела // Вестн. Моск. Ун.-та. Сер. 2. Химия. 2012. Т. 53. № 1
5. Bathias, C. Paris P. C., Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice // Marcel Dekker Publisher Co. – 2005. – 328 p.

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОКРЕСТНОСТИ ОСОБЫХ ТОЧЕК

Матвеенко В.П., Федоров А.Ю.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, д. 1, ул. Академика Королёва, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: mvp@icmm.ru, fedorov@icmm.ru

Функционально-градиентные материалы (ФГМ или просто градиентные материалы) характеризуются изменением своих механических свойств в пространстве. Градиентные свойства таких материалов позволяют получить результаты, которые не могут быть достигнуты в однородных или кусочно-однородных материалах. Большая часть теоретических исследований ФГМ была посвящена макроскопическому механическому и термическому поведению. В работе [1] отмечен существенный прогресс в понимании влияния градиентов на напряжённое состояние в таких материалах.

Одним из ожидаемых важных эффектов является влияние градиентных свойств на поведение напряжений вблизи особых точек (линий), где согласно классической теории упругости могут иметь место сингулярные решения, связанные с появлением в этих точках бесконечных значений напряжений. Анализ известных сингулярных решений для однородных и кусочно-однородных упругих двумерных и трёхмерных тел показывает, что в окрестности особых точек поверхности поведение напряжений определяется геометрией тела и значениями упругих характеристик материалов. В работах [2–4] рассмотрены примеры решения задач оптимизации геометрии в окрестности особых точек упругих тел и продемонстрирована эффективность изменения геометрии для устранения концентрации напряжений вблизи особых точек. Известны случаи, когда недопустимо изменение геометрических параметров в окрестности особых точек, в этом случае становится актуальной возможность изменения поведения напряжений вблизи особых точек на основе использования градиентных свойств материалов. В литературе стали появляться достаточно много исследований на данную тему. Большинство работ связано с анализом напряжений в вершинах трещин, однако с практической точки зрения больший интерес представляет использование ФГМ в соединениях двух материалов. В работе [5] приводятся результаты расчёта напряжений при использовании покрытий с кусочно-однородными свойствами и покрытий из ФГМ. Отмечается, что использование ФГМ позволяет устранить сингулярность напряжений в краевых точках.

В настоящей работе поставлена задача оптимизации напряжённого состояния за счёт выбора свойств функционально-градиентных материалов в окрестности особых точек и рассмотрены примеры решения оптимизационных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-31-00245 мол_а) и в рамках Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-10-1-18).

Литература

1. Suresh S., Mortensen A. Fundamentals of Functionally Graded Materials, Processing and Thermomechanical Behavior of the Graded Metals and Metal – Ceramic Composites, IOM Communications Ltd, The University Press Cambridge, Cambridge, 1998.
2. Борзенков С.М., Матвеенко В.П. Оптимизация упругих тел в окрестности особых точек // Известия РАН. МТТ. – 1996. – № 2. – С. 93–100.
3. Matveyenko V.P., Borzenkov S.M. Semianalytical singular element and its application to stress calculation and optimization // Int. J. Numer. Meth. Eng. – 1996. – V. 39, N. 10. – P. 1659-1680.
4. Матвеенко В.П., Федоров А.Ю. Оптимизация геометрии составных упругих тел как основа совершенствования методик испытаний на прочность клеевых соединений // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2011. – Т. 4, № 4. – С. 63–70.
5. Hill M.R., Lin W.-Y. Residual stress measurement in a ceramic-metallic graded material // J. Eng. Mater. Tech. – 2002. – V. 124, N. 2. – P. 185–191.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕГИСТРАЦИИ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН

Спаскова Е.М., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Центр экспериментальной механики, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, Российская Федерация,
e-mail: cem.spaskova@mail.ru, cem_tretyakov@mail.ru, wildemann@pstu.ru

При эксплуатации композиционных материалов в промышленности возникает необходимость контроля состояния структуры из-за наличия повреждений и дефектов, как производственных, так и эксплуатационных. К часто встречающимся дефектам относятся дефекты типа нарушения сплошности: расслоения, непроклеивания, непрорессовка, трещины, воздушные или газовые раковины [1].

В данной работе изложены экспериментальные данные при растяжении и совместном растяжении с кручением образцов слоистых композиционных материалов с предварительно внедренными технологическими дефектами, соответствующими возможной непропрессовке и непроклеиванию слоев материала в заданной ограниченной области. Образцы представляют собой прямоугольные пластины с дефектами различной суммарной площадью поверхности.

Механические испытания на одноосное растяжение и совместное растяжение с кручением проводились на универсальной двухосевой сервогидравлической системе Instron 8850. С помощью цифровой оптической видеосистемы Vic-3D регистрировались поля деформации в области дефекта на поверхности образца [2]. Неоднородное распределение температур было получено с помощью инфракрасной тепловизионной системы Flir SC7600 [4].

В ходе проделанной работы исследована эволюция неоднородных полей деформаций и температурных полей в телах с заложенными дефектами, рассмотрена методика с использованием современных средств диагностики, которая дает возможность обнаружения технологических дефектов в образцах композиционных материалов, и представляется перспективной при контроле и диагностике полунатурных элементов конструкций [3, 4].

Исследована возможность оценки деформаций на поверхности образцов в зоне дефектов с помощью наклеиваемых оптоволоконных датчиков. Работы проводились в Центре экспериментальной механики ПНИПУ при совместном участии сотрудников Научно-образовательного центра авиационных композитных технологий ПНИПУ.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00243) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

1. Панин С.В., Бурков М.В., Бяков А.В., Любутин П.С. Комбинированный метод исследования деформации и разрушения образцов из углерод-углеродного композиционного материала по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии // Вестник науки Сибири: электронный научный журнал / Томский политехнический университет (ТПУ). – 2012. – № 4 (5). – С. 129–138
2. 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.
3. Wildemann V. E., Spaskova E. V., Shilova A. I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation // Solid State Phenomena Vol. 243 (2016) pp 163–170
4. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Спаскова Е.М., Чихачев А.И. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 159–170

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ГИГАЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Оборин В.А.[1], Бачурихин В.П.[2], Соковиков М.А.[1], Билалов Д.А.[1], Наймарк О.Б.[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред УрО РАН, д. 1, ул. Ак. Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация, e-mail: oborin@icmm.ru*

[2]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», д.15, ул. Букирева, г. Пермь,614990, Российская Федерация*

В работе проведено исследование кинетики роста усталостных трещин в сплаве алюминия и магния АМг6 в режиме гигацикловой усталости [1] при предварительном квазистатическом и динамическом деформировании. Актуальность постановки определяется важными приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полётного цикла при случайных динамических воздействиях.

Предварительное нагружение образцов из сплава алюминия и магния АМг6 осуществлялось квазистатическим растяжением на сервогидравлической испытательной машине Biss Bi-00-100 и динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского при скоростях деформации до ~10^3 $с^{-1}$, после чего образцы подвергались циклической нагрузке при комнатной температуре 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 1-го 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 нагружении цилиндрических образцов за число циклов, соответствующих многоцикловой усталости (10^6–10^7), трещина росла с поверхности образца. При разрушении на базе 10^8 циклов и более трещина образовывалась внутри образца, и на поверхности разрушения наблюдалась характерная для такого режима усталости область излома – «рыбий глаз» («fish-eye»), в центре которой находится очаг разрушения, окруженный областью с фрагментированной (субмикрокристаллической) структурой.

Сравнение скейлинговых характеристик образцов, нагруженных в условиях много- и гигацикловой усталости, позволило установить существенное уменьшение диапазона пространственных масштабов (0,5-10,9 мкм), на которых показатель Хёрста [2] остается постоянным для динамически нагруженных образцов в зоне «fish-eye».

Химический состав сплава АМг6 определялся с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400n по спектру излучения отраженных электронов с помощью модуля INCA. По данным сканирующей электронной микроскопии распределение элементов по сплаву не равномерно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-48-590534 р_а, 15-08-08921, 16-41-590892 р_а, 14-01-00842).

Литература

1. Оборин В.А., Банников М.В., Наймарк О.Б., Palin-Luc T. Масштабная инвариантность роста усталостной трещины при гигацикловом режиме нагружения // Письма в журнал технической физики. – 2010. – том 36. – вып. 22. – С. 76–82.

2. Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Соковиков М.А., Билалов Д.А., Наймарк О.Б. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМг6 при усталостном и динамическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 2. – С. 116–126.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕКСТУРЫ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА БЕСШОВНЫХ ТРУБ

Пышминцев И.Ю. [1], Веселов И.Н.[1], Яковлева А.А.[1], Лобанов М.Л.[2], Данилов С.В.[2]

ОАО «РосНИТИ», д. 30, ул. Новороссийская, г. Челябинск, 454139, Российская Федерация, e-mail: PyshmintsevIU@rosniti.ru, VeselovIN@sinara-group.com, YakovlevaAA@sinara-group.com, УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация, e-mail: m.l.lobanov@urfu.ru, s.v.danilov@bk.ru.

В качестве объекта исследования использованы образцы, отобранные от бесшовных горячедеформированных нефтегазопроводных труб, изготовленных из низкоуглеродистой микролегированной стали марки 08ХМФЧА.

В данной работе используя метод ориентационной микроскопии EBSD, были исследованы структурно-текстурные состояния образцов из стали марки 08ХМФЧА на различных технологических стадиях изготовления бесшовных труб: 1) после горячей деформации; 2) после термической обработки, включающей закалку и высокий отпуск.

Показано, что на завершающем этапе горячей деформации структура стали по всей толщине стенки трубы состоит из вытянутых в направлении прокатки нерекристаллизованных зерен аустенита. Предположительно их текстура характеризовалась наличием четырех рассеянных ориентировок: двух из {112}<111> и двух из {111}<112>.

В процессе охлаждения после горячей деформации происходит равновесное $\gamma \rightarrow \alpha$-превращение с зарождением новых и ростом ферритных зерен либо до границы зерен аустенита, либо до столкновения друг с другом. Сформированная ферритная структура, характеризуется наличием рассеянной аксиальной текстуры с осью <111>, направленной вдоль образующей трубы. Данную текстуру можно представить совокупностью четырех рассеянных компонент: две из {112}<110> и две из {110}<112>.

После закалки мартенсито-бейнитная смесь характеризуется наличием той же, но более выраженной текстуры, что и феррит, сформированный при медленном охлаждении. В процессе высокого отпуска морфология структурных составляющих и, соответственно, их текстура практически не изменяются.

В заключение можно отметить, что установленный факт текстурной наследственности в стали 08ХМФЧА предположительно связан с формированием текстуры деформации и может быть объяснен воспроизводством при каждом фазовом переходе между кристаллитами особых разориентаций-специальных границ Σ3, Σ11.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МЕТАЛЛА ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ В НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Сандомирский С.Г.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, д. 12, ул. Академическая, г. Минск, 220072, Республика Беларусь, e-mail: sand@iaph.bas-net.by

Актуальная необходимость прогнозирования и неразрушающего контроля напряженного состояния металла магистральных трубопроводов активизировала исследования влияния механических нагрузок на магнитные характеристики трубных сталей. Для контроля напряженного состояния металла, находящегося под действием нагрузки, используют результаты измерения коэрцитивной силы H_c, остаточной намагниченности M_r и максимальной магнитной проницаемости μ_m металла. Но трудоемкость и точность измерения этих параметров различна. По стандартным методикам H_c и M_r магнитомягких (с $H_c \leq 4$ кА/м) ферромагнитных материалов могут быть измерены с относительной погрешностью δ не более ±3%. На порядок более трудоемкое измерение μ_m по стандартной методике может быть осуществлено с $\delta = \pm 5\%$. При исследованиях влияния механических нагрузок на магнитные параметры металла труб большую часть времени исследователи тратят на измерения μ_m образцов.

Цель доклада – использование связи, установленной между магнитными характеристиками термообработанных сталей в магнитном структурном анализе, для описания связи между магнитными параметрами металла трубных сталей в напряженном состоянии. Определение условий, при которых результаты измерения максимальной магнитной проницаемости металла могут быть рекомендованы для контроля его напряженного состояния.

В докладе связь, установленная между остаточной намагниченностью, коэрцитивной силой и максимальной магнитной проницаемостью сталей в магнитном структурном анализе, использована для описания связи между этими магнитными параметрами металла (основной металл, шов, околошовная зона) трубных сталей в напряженном состоянии. С использованием разработанной методики статистическим анализом показано, что механические напряжения не изменяют взаимосвязи между магнитными характеристиками металла, существующей в не напряженном состоянии:

$$\mu_m \approx [0{,}5 + 0{,}00006\,\gamma H_c - (0{,}000068\,\gamma H_c)^2]\,M_r / H_c\,, \quad (1)$$

где $\gamma = 1$ м/А – коэффициент, определяемый размерностью параметра H_c.

Результат μ_{m0p} расчета по формуле (1) параметра μ_m трубных сталей в не напряженном состоянии используем для вычисления коэффициента ξ:

$$\xi = \mu_{m0}/\mu_{m0p} \quad (2)$$

где μ_{m0} – значение μ_m трубных сталей в не напряженном состоянии (напряжения $\sigma = 0$).

Для расчета μ_m трубных сталей в напряженном состоянии ($\sigma \neq 0$) можно использовать результаты измерений H_c и M_r металла этих сталей, находящихся в напряженном состоянии:

$$\mu_m \approx \xi[0{,}5 + 0{,}00006\,\gamma H_c - (0{,}000068\,\gamma H_c)^2]\,M_r / H_c\,. \quad (3)$$

Полученный результат позволяет рекомендовать использование формулы (3) для расчета μ_m металла трубных сталей, подвергнутого нагрузке или пластической деформации, по результату измерения его H_c, M_r и μ_m в исходном состоянии и параметров H_c и M_r в напряженно-деформированном состоянии. Он объясняет так же повышенную чувствительность μ_m сталей к действующим приложенным напряжениям в случаях, когда увеличение H_c стали сопровождается уменьшением ее M_r.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УСТАЛОСТНОГО НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Белоногов Н.С., Лобанов Д.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614000, Российская Федерация

e-mail: wildemann@pstu.ru, cem_staroverov@mail.ru, cem.belonogov@gmail.com, cem_lobanov@mail.ru

Проектирование конструкций и сооружений с применением новых композиционных материалов неотъемлемо связано с развитием моделей, базирующихся на получении экспериментальных данных об основных закономерностях механического поведения композитов. Большинство современных инженерных конструкций содержат элементы, испытывающие циклические или пульсирующие нагрузки, вызывающие усталостное разрушение. Для развития новых методов получения экспериментальных данных о поведении композиционных материалов, в частности слоисто-волокнистых композитов, были предложены и апробированы методики исследования процессов усталостного накопления повреждений исследуемого материала.

В работе обсуждаются вопросы исследования усталостных характеристик при различных схемах нагружения и наличии концентраторов, а также оценки изменения деформационных и прочностных свойств в результате предварительных циклических воздействий, основанные на методиках экспериментального исследования особенностей механического поведения композиционных полимерных волокнистых материалов с использованием современного испытательного оборудования Центра экспериментальной механики ПНИПУ при сложных комбинированных режимах нагружения. Циклическое воздействие проводилось с использованием универсальной испытательной системы Instron E10000, которая позволяет реализовать испытания с частотой до 100 Гц.

По разработанным методикам были проведены серии испытаний. Получены новые экспериментальные данные о поведении слоисто-волокнистых композитов при циклическом воздействии, процесс циклического нагружения и усталостной прочности полимерного волокнистого композиционного материала описан с помощью функции накопления повреждений. По полученным экспериментальным данным проведен анализ и построены диаграммы усталостной долговечности.

В работе предложены дальнейшие способы развития методик, связанных с экспериментальным исследованием поведения стеклопластиков в условиях циклического нагружения.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке по гранту РФФИ (проект № 16-41-590360 р_а).

Литература

1. Разрушение конструкций из композитных материалов/ И.В. Грушецкий, И.П. Дмитриенко, А.Ф. Ермоленко и др.; Под редакцией В.П. Тамужа, В.Д. Протасова – Рига: Зинатне, 1986. – 264 с.

2. Методы статических испытаний армированных пластиков/ Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

3. 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.

ON THE NUMERICAL SIMULATION OF THE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION INDUCED BY LASER ADDITIVE MANUFACTURING

Zinoviev A.[1,2], Zinovieva O.[1,2], Ploshikhin V.[2], Romanova V.A.[1], Balokhonov R.R.[1,3]

[1]*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russia, e-mail: emelyanova@ispms.tsc.ru*

[2]*Airbus Endowed Chair for Integrative Simulation and Engineering of Materials and Processes, University of Bremen, Am Fallturm 1, TAB, Bremen, 28359, Germany*

[3]*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia*

Additive manufacturing regarded as a driving force of the third industrial revolution provides significant advantages over existing manufacturing techniques. Yet the former approach has some limitations, with a strong microstructural inhomogeneity of additive manufactured parts being among them. The mechanical behavior of the components so produced is known to be profoundly affected by material microstructure. The latter, in its turn, depends on the material and process parameters.

In this work, a two-dimensional (2D) numerical model has been developed to provide a robust description of the grain structure formation and evolution during laser additive manufacturing. The realized approach takes into account the mechanisms of microstructural development and the thermal processes during additive manufacturing on the mesoscopic scale. The model is based on original algorithms developed using a modified cellular automata (CA) method proposed by Rappaz and Gandin to describe the formation of grain structure during solidification [1] together with the classical numerical finite difference (FD) solution of the heat transfer equation [2]. The double ellipsoid heat source model is used to calculate the heat input during laser additive manufacturing. Selective laser melting process, which consists of sequential deposition of a metal powder on a polycrystalline substrate followed by its scanning with a high-power laser beam, is examined.

The evolution of grain structure in processed steel specimens has been studied with the use of developed model. The 2D CAFD simulations are shown to adequately describe the growth competition between adjacent grains, through-the-thickness grain growth, and texture formation during selective laser melting. The results of the CAFD simulations agree well with the experimental data, which makes it possible to use the developed model for the analysis and optimization of the evolution of grain structure induced by the selective laser melting process.

Support of the Bremen Research Scholarship Grant and Fundamental Research Program of the State Academies of Sciences for 2013–2020 is gratefully acknowledged.

References

1. M. Rappaz, Ch.-A. Gandin, Probabilistic modelling of microstructure formation in solidification processes, Acta Metall. Mater., 41 2 (1993) 345-360.

2. O. Zinovieva, A. Zinoviev, V. Ploshikhin, V. Romanova, R. Balokhonov, A solution to the problem of the mesh anisotropy in cellular automata simulations of grain growth, Comput. Mater. Sci., 108 (2015) 168–176.

МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ С ДЕФЕКТАМИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ

Наймарк О.Б.

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

Теоретическое и экспериментальное исследование посвящено изучению связи механизмов структурной релаксации, обусловленных различными типами метастабильных состояний в твердых телах с дефектами, неустойчивостью деформирования и развитием разрушения в широком диапазоне интенсивностей нагружения [1–3]. Показано, что «распад» метастабильных состояний сопровождается зарождением и развитием многомасштабных коллективных мод ансамблей мезодефектов (микросдвигов, микротрещин) в условиях неравновесных (структурно-скейлинговых) переходов и описывается кинетикой двух структурных переменных – тензора плотности дефектов, имеющего смысл деформации, обусловленной дефектами, и параметра структурного скейлинга, представляющего отношение двух характерных масштабов – среднего размера дефекта и расстояния между ними. На основе статистико-термодинамического описания установлены два критических значения параметра структурного скейлинга, определяющих различные области метастабильности термодинамического потенциала (неравновесной свободной энергии среды с дефектами) и типы многомасштабных коллективных мод ансамблей дефектов: автоволновые моды, характерные для механизмов локализованной пластической неустойчивости, и моды “обострения”, приводящие к формированию очагов разрушения. Коллективные моды имеют природу автомодельных решений полученных эволюционных уравнений для обсуждаемых структурных переменных. Закономерности «возбуждения» и развития коллективных мод связываются с механизмами неустойчивости и разрушения в конденсированных средах с дефектами и использованы для объяснения оригинальных экспериментов: упруго-пластические переходы в ударных волнах (релаксация упругого предвестника, степенная универсальность пластических волновых фронтов в металлах и жидкостях), «резонансное» возбуждение множественных очагов разрушения при отколе, «волн разрушения», пространственно-временная универсальность статистики фрагментации в стеклах и керамиках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант № 14-19-01173.

Литература

1. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика, 2004, Т.6, с. 45–72.
2. Соковиков М.А, Билалов Д.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации // Письма в Журнал технической физики, 2014, Том.40, Выпуск 23, с.82–88.
3. Ляпунова Е.А., Петрова А.Н., Бродова И.Г., Наймарк О.Б., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В. Исследование морфологии многомасштабных дефектных структур и локализации пластической деформации при пробивании мишеней из сплава А6061// Письма в Журнал технической физики, 2012, Том 38, Выпуск 1, с.13–20.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПРОБИВАНИИ ПРЕГРАД

Билалов Д.А., Соковиков М.А., Баяндин Ю.В., Чудинов В.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б.

ИМСС УрО РАН, д. 1, ул. Академика Королёва, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: ledon@icmm.ru

Работа посвящена исследованию процесса локализации пластической деформации и разрушения металлов (алюминиевые сплавы АМг6, Д16) при динамическом нагружении. В качестве одного из вариантов динамических нагружений рассматривался эксперимент на высокоскоростное пробивание преград цилиндрическим ударником. При этом разрушение происходит в виде выноса «пробки» из преграды.

В эксперименте ударник (снаряд) разгонялся газовой пушкой и соударялся с закреплённой цилиндрической преградой. В процессе испытания тыльная поверхность пробиваемой мишени в режиме реального времени исследовалась высокоскоростной инфракрасной камерой CEDIP Silver 450M.

После пробивания на сохранённых образцах проводился фрактальный анализ морфологии поверхности разрушения при помощи оптического интерферометра-профилометра NewView-5010 в терминах масштабно-инвариантного показателя (показателя Хёрста) [1].

Было проведено математическое моделирование исследуемого процесса. Модель, построенная на базе широкодиапазонных определяющих соотношений деформируемого твёрдого тела с дефектами [2] и учитывающая эволюцию дефектов в рамках тензорного параметра поврежденности, была внедрена в пакет прикладных программ Abaqus для проведения трёхмерных расчётов. Результаты численных расчётов качественно и количественно соответствуют полученным экспериментальным данным.

Экспериментальное исследование локализации деформации при динамическом нагружении в сочетании с инфракрасными измерениями и численным моделированием позволяет рассматривать переход к разрушению адиабатическим сдвигом как механизм, индуцированный структурными изменениями в материале. Измеренная температура в зоне локализации не подтверждает традиционные представления о механизмах локализации деформации как автокаталитически контролируемого температурой процесса вязкопластического течения. Структурный анализ показал коррелированное поведение ансамбля микросдвигов, которое может быть классифицировано, как структурный переход, обеспечивающий локализацию деформации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 14-19-01173.

Литература

1. Froustey C., Naimark O., Bannikov M., Oborin V., Microstructure scaling properties and fatigue resistance of pre-strained aluminium alloys (part 1: Al-Cu alloy), European Journal of Mechanics A/Solids. 29, (2010) 1008-1014.

2. Д.А. Билалов, М.А. Соковиков, В.В. Чудинов, В.А. Оборин, Ю.В. Баяндин, А.И. Терёхина, О.Б. Наймарк Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 319–328

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ГИДРОЭКСТРУЗИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ У8А

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

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

Одним из перспективных направлений улучшения свойств металлических материалов является формирования ультрамелкозернистой структуры, в частности, с помощью интенсивной пластической деформации. Следует, однако, отметить, что в литературе достаточно подробно описано влияние деформирования методом гидроэкструзии на структуру и свойства чистых металлов, а особенностям гидроэкструзии таких широко распространенных материалов, как стали, уделено гораздо меньше внимания. В настоящей работе представлены результаты исследования механических и магнитных свойств, а также скорости распространения упругих волн перлитной стали У8А, подвергнутой интенсивной пластической деформации методом гидроэкструзии. Установлено, что при увеличении степени деформации происходит монотонное возрастание временного сопротивления, условного предела текучести и уменьшение относительного удлинения. При этом увеличивается отношение условного предела текучести к временному сопротивлению, что свидетельствует об уменьшении резерва деформационного упрочнения материала и возрастании опасности его хрупкого разрушения. В то же время зависимости магнитных характеристик (коэрцитивной силы, максимальной магнитной проницаемости и остаточной индукции) от степени накопленной деформации при гидроэкструзии имеют экстремум. Это обстоятельство можно объяснить особенностями формирования структуры при такой схеме деформирования. Показано, что в случае оценки прочностных свойств в изделиях из исследуемой стали после интенсивной пластической деформации методом гидроэкструзии наиболее эффективно совместное использование коэрцитивной силы, максимальной магнитной проницаемости, остаточной индукции, скорости распространения упругих волн до степени деформации 1,76, а при более высоких степенях деформации - среднеквадратичного значения напряжения магнитных шумов Баркгаузена.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием (№ ГР 01201354598) и при поддержке проекта УрО РАН № 15-10-1-22.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОРТОТРОПНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Баяндин Ю.В., Пантелеев И.А., Житникова К.А., Наймарк О.Б.

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

Композиционные материалы обеспечивают высокие характеристики прочности и надежности при снижении веса конструкции в достаточно широком диапазоне интенсивностей нагружения. В общем случае, композиционные материалы представляют собой материал, состоящий из двух или более компонентов, которые можно разделить на армирующие элементы (наполнитель) и на матрицу (связующее). Механическое поведение композиционных материалов определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связей между ними. Характеристики и свойства создаваемого изделия зависят от выбора исходных компонентов и технологии их совмещения. При совмещении армирующих элементов и матрицы получается материал, обладающий набором свойств, отражающими не только исходные характеристики его компонентов, но и новые свойства, которыми отдельные компоненты не обладают.

В данной работе представлено экспериментальное и теоретическое исследование механических и прочностных свойств ортотропных композиционных материалов. Анизотропия композиционного материала вызвана способом его изготовления. Рассматриваются композиты из стеклоткани на основе эпоксидной смолы (ламинаты). Материал считается ортотропным, а оси ортотропии совпадают с характерными направлениями укладки волокон. Целью является построение математической модели деформирования и разрушения композиционных материалов в условиях квазистатического и динамического нагружений. Разработанная математическая модель была адаптирована к конечно-элементному комплексу прикладных программ Abaqus, что позволяет проводить численное моделирование на основе оригинальных определяющих соотношений ортотропной среды с учетом накопления поврежденности.

Экспериментальные исследования проводились на одноосное деформирование в направлении основы (укладки) стеклоткани. Плоские образцы подвергались квазистатическому одноосному растяжению на нагружающей машине Shimadzu AG-X Plus вплоть до разрушения. Скорость нагружения образцов составляла 1 мм/мин. Для измерения продольной и поперечной деформации образцов использовался видеоэкстензометр TRViewX240S f12.5 (класс точности 0.5).

Упругие характеристики и предельные значения напряжений/деформаций оценивались по диаграммам деформирования. Вклад поврежденности композиционного материала учитывался на основе разработанной нелинейной модели твердого с дефектами, которая была внедрена в пользовательские процедуры UMAT и VUMAT конечно-элементного комплекса прикладных программ Abaqus. Критерий разрушения задавался с помощью модели разрушения XFEM в виде достижения деформации, обусловленной дефектами (поврежденности), критического значения, который также определялся из эксперимента.

В работе приводится сравнение результатов натурных испытаний с результатами численного моделирования для плоских образцов из ортотропного композиционного материала в случае одноосного деформирования. Получены адекватные результаты по моделированию деформирования и разрушения ортотропных композиционных материалов. Развитая математическая модель также позволяет учитывать сложное напряженное состояние, в общем случае не совпадающее с осями симметрии исследуемого материала, и может быть применена для прочностного анализа реальных конструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сколковского института науки и технологий (соглашение № 319-MRA) и гранта РФФИ № 14-01-00842.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ЗАГОТОВОК ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА РЫЧАЖНОЙ РАДИАЛЬНО-КОВОЧНОЙ МАШИНЕ

Карамышев А.П.[1], Некрасов И.И.[1], Нестеренко А.В.[2], Паршин В.С.[1], Смирнов С.В.[2], Федулов А.А.[1], Швейкин В.П.[2]

[1]*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,*
e-mail: andrey.karamyshev@yandex.ru

[2]*Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

Большинство изделий из конструкционных материалов производят путем обработки давлением. Причем, если при горячей обработке происходят процессы динамической рекристаллизации, то при холодной обработке наблюдается деформационное упрочнение с одновременным накоплением поврежденности. Для снижения интенсивности поврежденности применяют схемы нагружения, когда в очаге деформации превалируют сжимающие напряжения и реализуется так называемое мягкое напряженное состояние.

В данной работе в качестве оборудования для пластического деформирования выбрана рычажная радиально-ковочная машина (РКМ), в очаге деформации которой, высока доля сжимающих напряжений и холодная пластическая деформация может производиться до больших степеней без промежуточных отжигов. Процесс накопления поврежденности в очаге деформации рычажной радиально-ковочной машины изучен недостаточно, поэтому основной задачей работы являлось выбрать оптимальный метод и применить его для изучения закона накопления поврежденности (пор) в процессе радиального обжатия. В качестве образцов для исследования были взяты алюминиевый сплав и хромоникелевая сталь мартенситного класса. Кроме этой задачи, была поставлена цель проверки адекватности созданных математических моделей расчета поврежденности, при ковке на рычажной РКМ.

Комплекс проведенного исследования поврежденности включал в себя три составные части. На первой стадии были выполнены эксперименты по оценке неравномерности напряженно-деформированного состояния при пластической обработке на рычажной РКМ, посредством замеров твердости по HM и HV в радиальном направлении поперечного сечения образцов, с разными степенями деформаций. На втором этапе работ было проведено исследование пластического разрыхления методом гидростатического взвешивания. На третьем этапе, для подтверждения зависимости плотности кованых прутков от степени деформации, полученной методом гидростатического взвешивания, производились фрактографические исследования изломов образцов на сканирующем электронном микроскопе.

Исследование показало, что по мере роста обжатия исходного прутка из алюминиевого сплава плотность материала уменьшается, что можно связать с появлением и увеличением числа микродефектов сплошности, в процессе пластической деформации. Минимум достигается при обжатии 40%, далее плотность увеличивается, приближаясь к плотности исходного прутка, происходит залечивание дефектов. Характер изменения плотности прутков из стали в процессе обжатия иной. После монотонного снижение плотности до 40% деформации наступает этап насыщения, когда с ростом деформации плотность остается неизменной или даже слегка увеличивается. Результаты фрактографических исследований материалов находятся в полном соответствии с данными плотности образцов, полученных путем гидростатического взвешивания.

В основе получения больших степеней деформаций при обработке заготовок на рычажной РКМ является реализация схемы всестороннего неравномерного сжатия, развивающегося на всем этапе деформирования. Математические модели определения величины поврежденности адекватно отражают реальный процесс и согласуются с экспериментальными данными.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОБИВАНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДЫ

Мехоношина Т.Г.[1,2], Соковиков М.А.[1,2], Баяндин Ю.В.[1,2], Наймарк О.Б.[1,2]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: tatyana92.92.92@mail.ru*

[2]*ИМСС УрО РАН, д. 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация*

В данной работе рассматривается процесс пробивания преграды с наружным керамическим слоем из корундовой керамики Al_2O_3, в качестве подложке используется слой сплава алюминия Д16, проявляющий в процессе динамического нагружения упруго-пластические свойства.

Наружный керамический слой воспринимает основную ударную нагрузку, дробится на мелкие частицы и рассеивает кинетическую энергию снаряда. Остаточная кинетическая энергия снаряда поглощается упруго-пластической деформацией подложки.

Вычислительный эксперимент, соответствующий реализуемой схеме нагружения материала, проводился с использованием системы определяющих уравнений, предложенных в [1] и отражающих механизмы разрушения, обусловленные коллективным поведением микродефектов.

Для описания динамического деформирования используются: закон Гука для материала лицевого керамического слоя; уравнение неразрывности; уравнение движения и условие аддитивности упругой и пластической деформации для материала подложки. Данное условие принимается в силу того, что упругие деформации малы, а пластические поведение материала подложки описывается на основе теории пластического течения.

Система основных уравнений дополняется начальными и граничными условиями. Исследуется случай «нормального» взаимодействия преграды с ударником, скорость которого в момент соударения имеет только осевую компоненту. На границах, свободных от напряжений, выполняется условие нулевых напряжений. На участке контакта между телами ставится условие идеального скольжения. Моделирование задачи соударения проводится численно с использованием конечно-элементного пакета прикладных программ.

В результате численного моделирования были получены данные о различных степенях разрушения преграды в зависимости от скорости соударения и толщины защитного слоя.

Проведены оценки энергии затраченной на разрушение преграды при различных скоростях соударения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант № 14-19-01173.

Литература

1. Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терёхина А.И., Наймарк О.Б. Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, №3. – С. 319–328.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАВНОВЕСИЯ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ ПРОСТРАНСТВА. МЯГКОЕ И ЖЕСТКОЕ НАГРУЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ

Бердников К.В., Стружанов В.В.

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

Процесс расчета положений равновесия механических систем с учетом стадии деформационного разупрочнения материала, как правило, осложняется тем, что формулируемые краевые задачи не удовлетворяют требованиям единственности решения, так как одному напряженному состоянию соответствуют два деформированных, одно из которых отвечает состоянию упрочнения, другое – состоянию разупрочнения. Поэтому требуются модифицированные алгоритмы расчета, учитывающие вышеописанную особенность формулируемых задач. Наиболее актуальным представляется разработка таких алгоритмов для континуальных механических систем, так как такие системы могут служить моделями некоторых реальных процессов.

Рассматривается частный случай континуальной механической системы деформируемой в условиях полярной симметрии напряжений и деформаций, которая представляет собой пространство со сферической полостью. Предполагается, что материал вокруг полости обладает эффектом деформационного разупрочнения. Свойства материала описываются моделью Генки при неположительной объемной деформации, в этом случае объемный модуль сохраняет постоянное значение на всех стадиях деформирования, включая также и стадию разупрочнения, которая характеризуется ниспадающим до нуля участком единой кривой.

Расширение полости возможно как при задании равномерного внутреннего давления (мягкая схема нагружения), так и посредством задания перемещений точкам границы сферы (жесткая схема нагружения). Формулируются краевые задачи, состоящие из уравнения равновесия, соотношений Коши, граничных условий, соответствующих каждому типу нагружения, а также инкрементального закона пластичности, позволяющего по величине полных деформаций определять их неупругую составляющую. Полагается, что единая кривая, описывающая свойства материала, аппроксимируется параболой.

Для расчета кривой равновесных состояний полости организовывается итерационная процедура, представляющая собой метод простых итераций. Далее устанавливается механическая интерпретация этого метода в рассматриваемой задаче. Часть материала, прилегающего к поверхности полости, при деформировании приобретает остаточную деформацию, которая входит в формулировку исходной краевой задачи и заранее неизвестна. Поэтому исходная задача разбивается на основную и корректирующую задачи. При этом основная задача является классической задачей теории упругости. А корректирующая задача представляет собой задачу по определению остаточных самоуравновешенных напряжений. Сначала решается основная задача, и по найденным полным деформациям с помощью инкрементального закона пластичности определяются их неупругие составляющие. Также вычисляются величины областей упрочненного и разупрочненного материала. Затем найденная неупругая составляющая подставляется в корректирующую задачу, решение которой складывается с решением основной задачи (первая корректировка). Для суммарных совместных деформаций снова определяется их неупругая составляющая, вычисляются области упрочнения, разупрочнения и производится следующая корректировка. И так далее.

Приведены примеры расчета положений равновесия сферической полости в пространстве в случаях её расширения по мягкой и жесткой схемам нагружения, демонстрирующие описанные алгоритмы.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СЛОИСТОЙ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛЫ КОРИОЛИСА И ТЕПЛООБМЕНЕ ПО ЗАКОНУ НЬЮТОНА

Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.

ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург

В работе получены аналитические решения стационарного слоистого течения Куэтта вязкой несжимаемой жидкости по нагреваемой вращающейся плоскости с учетом конвекции. Теплообмен слоя жидкости на свободной поверхности и с плоскостью происходит по закону Ньютона-Рихмана. Течение описывается уравнениями Обербека-Буссинеска [1] с учетом силы Кориолиса в приближении f плоскости. Скорость жидкости на верхней свободной поверхности определяется постоянным вектором $\vec{W}$. Рассматривается движение вблизи оси вращения и центробежной силой можно пренебречь.

Решение исходной системы представляется в 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 полается равной нулю.

После подстановки представления решения в исходные уравнения получим краевую задачу для системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, решение которой получено аналитически.

Показано, что при некоторых значениях числа Экмана возникает слой жидкости с обратным течением. При некотором соотношении параметров возникает эффект «остановки» жидкости. Проведен анализ зависимости решения от числа Экмана. Найдены решения при предельных значениях числа Экмана.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т 6. Гидродинамика. Изд 6, М.:Наука, 2006. 736 с.
2. Сидоров А.Ф. Об одном классе решений уравнений газовой динамики и естественной конвекции. // Численные и аналитические методы решения задач механики сплошной среды. УНЦ АН СССР - Свердловск, 1981. С.101–117.
3. Аристов С.Н., Просвиряков Е.Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции.//Нелинейная динамика. 2013. Т.9. № 3. С. 3–9.
4. Медведев С.Б. Геометрические приближения для уравнений вращающейся мелкой воды.// Вычислительные технологии, 2013. Т. 18. № 1. С. 45–64.
5. Головин С.В., Казакова М.Ю. Симметрии и точные решения уравнений динамической конвекции моря.// Уфимский математический журнал, 2012, Т. 4. № 4. С. 79–90.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ПЛОСКОЙ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ В ВИДЕ РАЗЛОЖЕНИЯ РЯДОВ ПО МАЛОМУ ПАРАМЕТРУ

Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.

ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург

Рассматривается плоская задача стационарной конвекции в потоке жидкости при малых числах Грасгофа. Используется полная система уравнений Навье-Стокса, описывающая стационарное движение неизотермической несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска [1,2]. На плоских границах потока – свободной и твердой – задан градиент температуры. На свободной поверхности задана скорость потока и внешнее давление.

Решение системы ищется в виде [2-4], которое обобщает решения, полученные Бирихом [5], Сидоровым [6] и Линем [7] – горизонтальная скорость линейна по координате x, давление и температура имеют квадратичную зависимость. Коэффициенты, стоящие при координате x зависят от поперечной координаты и времени. После подстановки представления решения в исходную систему получается нелинейная система обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассматривается случай, когда число Грасгофа является достаточно малым, но система уравнений уже не может быть линеаризована. Система интегрируется методом малого параметра Пуанкаре в виде ряда по степеням малого параметра, роль которого играет число Грасгофа.

Получены первые приближения решения до 4 порядка по степеням Gr. Проведено исследование условий возникновения противотока вблизи твердой поверхности в зависимости от граничного градиента температуры, числа Прандля и числа Грасгофа.

Литература

1. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т 6. Гидродинамика. М.: Наука., 2006. 736 с.
2. Аристов С.Н., Шварц К.Г. Конвективный теплообмен при локализованном нагреве плоского слоя несжимаемой жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2013. № 3. С. 53–58.
3. С. Н. Аристов, Е. Ю. Просвиряков 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.
4. Аристов С.Н., Просвиряков Е.Ю. Точные решения термокапиллярной конвекции при локализованном нагреве плоского слоя вязкой несжимаемой жидкости Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 3. С. 7–12.
5. Бирих Р.В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости. // ПМТФ, 1966. №3. С.69-72.
6. Сидоров А.Ф. Об одном классе решений уравнений газовой динамики и естественной конвекции. // Численные и аналитические методы решения задач механики сплошной среды. УНЦ АН СССР – Свердловск, 1981. С.101-117.
7. Lin C.C. Note on a class of exact solutions in magneto-hydrodynamics // Arch. Rational Mech. Anal. 1958. Vol. 1. P. 391–395

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ НА РЕАЛИЗАЦИЮ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАКРИТИЧЕСКОЙ СТАДИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Третьяков М.П., Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru

Изучение закритической стадии деформирования представляется необходимым для более полного понимания процессов, протекающих в материалах при деформировании, и непосредственно предшествующих их разрушению. С точки зрения анализа работы ответственных изделий и сооружений закритическая стадия деформирования связана с живучестью элементов конструкций в условиях появления и развития дефектов, а также с безопасностью при их разрушении. К настоящему времени сформулированы основные положения теории закритического деформирования, в частности, условия реализации стадии разупрочнения, связанные с обеспечением достаточной жесткости нагружающей системы [1], получены экспериментальные данные о разупрочнении ряда конструкционных сталей при различных видах напряженно-деформированного состояния [3-4].

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров нагружения на возможность реализации закритической стадии и устойчивости процесса деформирования при разупрочнении, то есть снижении нагрузок при прогрессирующих перемещениях.

В результате выполнения работы отмечена возможность стабилизации процесса закритического деформирования в условиях растяжения сплошных цилиндрических образцов при наложении дополнительных скручивающих вибрационных воздействий. Это отражается в получении полных диаграмм растяжения, которые соответствуют снижению нагрузки до нулевого значения к моменту разрушения при прогрессирующих перемещениях, в то время как при растяжении без дополнительных воздействий разрушение образца происходит при ненулевой нагрузке. Влияние дополнительных вибраций отражается в изменении поверхностей излома образцов при растяжении с дополнительными вибрационными воздействиями. В частности, увеличение параметров вибрационных воздействий привело к увеличению диаметра центральной волокнистой части излома, соответствующего типу «чашка-конус», которая при максимальной реализованной интенсивности вибраций распространяется практически на всю поверхность излома образца. Данное направление исследований представляется перспективным для описания поведения материалов в реальных условиях эксплуатации и развития экспериментальных методик и технологических процессов.

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. Физматлит, 1997. – 288 с.
2. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. и др. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2012. – 212 с.
3. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Анализ влияния жесткости нагружающей системы на стадию закритического деформирования материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 3. – С. 49–57.
4. Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьяков М.П. Закритическое деформирование сталей при плоском напряженном состоянии // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2014. – № 1. – С. 26–36.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ С УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ И НАНО–СТРУКТУРОЙ В ПУЧКЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

Крылова Т.А., Полетика И.М., Перовская М.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация, e–mail: krylovat@sibmail.com

Целью работы явилось формирование покрытий методом вневакуумной электронно–лучевой наплавки на низкоуглеродистую сталь Ст3 карбида вольфрама и смеси карбида вольфрама с никелем и карбидом титана.

После наплавки карбидом вольфрама на поверхности образцов стали Ст3 образуются слои толщиной 1.5–3.0 мм. Твердость по Виккерсу меняется в пределах 3.5–5.5 ГПа, а коэффициент износостойкости составляет 2.5–4.5. По данным рентгеноструктурного фазового анализа в структуре покрытий присутствует α-железо (мартенсит), малое количество γ-железа (аустенит), соединение Fe_3W_3C, WC, W_2C, $W_{23}C_6$. При малых значениях энергий излучения E структура слоя доэвтектическая, закаленная в основе слоя на мартенсит. С увеличением энергии E мартенситная структура сменяется сначала мартенситно– бейнитной, а затем ферритно–мартенситной.

Наплавка смесью карбида вольфрама с никелем и с карбидом титана в качестве модификатора приводит к образованию наплавленных слоев толщиной 1.2–4.7 мм, твердость по Виккерсу на поверхности покрытия 7–7.5 ГПа, среднего значения микротвердости в слое 5.5–5.8 ГПа и увеличению износостойкости до 25–35. Согласно данным рентгеноструктурного фазового анализа в слое обнаруживается значительное количество γ-железа, небольшое количество α-железа, карбид вольфрама Fe_3W_3C и карбид титана TiC. Интенсивность линий γ-железа намного превышает интенсивность линий α-железа, что свидетельствует об образовании аустенитно–мартенситной структуры с большой объемной долей износостойкой аустенитной фазой и малой объемной долей мартенситной фазы. Соединения никеля, как химически малоактивного элемента, не выявляются. Очевидно, весь никель находится в твердом растворе и действует, как сильнейший аустенизатор, обеспечивающий достижение высокой износостойкости слоя.

Другой серьезной причиной увеличения износостойкости является резкое измельчение структуры, связанное с введением в наплавочную смесь карбида титана.

Проведены испытания образцов с покрытиями на изгиб. В случае наплавки чистым карбидом вольфрама наблюдается катастрофическое разрушение – прочность покрытия и угол изгиба равны нулю. Металлографическая картина разрушения характеризует материал как очень хрупкий.

При наплавке смесью карбида вольфрама с никелем и карбидом титана предельная деформация и прочность до разрушения образцов с покрытиями заметно увеличиваются, угол их изгиба достигает 9–11°, а в области энергий 6.8–7.7 кДж/см^2 – 35–37°. Слой наплавки становится гораздо более пластичным, что видно из картины разрушения.

Показано, что слои, наплавленные карбидом вольфрама, обладают повышенной твердостью, но низкой износостойкостью, что связано с образованием в них структуры, состоящей из карбидов вольфрама, заключенных в хрупкую основу из мартенситной или бейнитной фазы. Введение в наплавочную смесь никеля и карбида титана приводит к существенному приросту износостойкости. Наблюдаемый эффект связан со способностью никеля стабилизировать износостойкую фазу – аустенит и с выпадением в слое множества дисперсных выделений TiC, служащих центрами кристаллизации в расплаве и приводящих к формированию ультрадисперсной, а на отдельных участках и наноразмерной структуры. Одновременно при использовании дополнительного легирования наплавленного слоя предельная деформация и прочность до разрушения образцов с покрытиями заметно увеличивается, а характер разрушения покрытий меняется от хрупкого до частично или полностью вязкого. Дополнительное существенное увеличение пластичности покрытий наблюдается при достижении в составе наплавленного слоя эвтектической точки Fe – TiC.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФРАГМЕНТАЦИИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Ляпунова Е.А.[1,2,3], Давыдова М.М.[2], Зайцев Д.В.[1], Панфилов П.Е.[1]

[1]*Институт естественных наук, Уральский Федеральный Университет, д. 48, ул. Куйбышева, г. Екатеринбург, 620000 Российская Федерация*

[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, д. 1, ул. Ак. Королева, г. Пермь, 614013 Российская Федерация*

[3]*Пермский государственный университет, д. 1, ул. Букирева, г. Пермь, 614990 Российская Федерация,*

e–mail: lyapunova@icmm.ru

Исследуется деформационное поведение и статистические закономерности разрушения оксидной керамики в условиях квазистатического одноосного сжатия в воздушной атмосфере при температуре 293 К и в среде жидкого азота (температура 77.4 К). Оксид алюминия синтезирован методом плазменного напыления, обеспечившим достаточно высокую однородность структуры и отсутствие крупных дефектов, что является чрезвычайно важным при механических испытаниях квазихрупких материалов. Напряжение разрушения цилиндрических образцов диаметром 8,75 мм и высотой 4,38 мм при испытаниях на воздухе составило 712 ґ 60 МПа, при испытаниях в среде жидкого азота 765 ґ 90 МПа; максимальная деформация до разрушения оказалась несколько выше для испытаний в среде жидкого азота, чем для испытаний на воздухе (14% и 13% соответственно).

Для определения особенностей разрушения образцы, сохраненные после механических испытаний, просеивались через сита с различной величиной ячейки (от 2.5 мм до 0.02 мм). Фрагменты из каждого сита взвешивались (по отдельности, если масса фрагмента была больше точности весов, составляющей 0.001 г, или группами для определения средней массы фрагмента) для определения статистики распределения фрагментов по массе, и фотографировались на цифровом оптическом микроскопе в режиме съемки на просвет для построения распределения фрагментов по площади проекции и периметру. Обнаружено, что фрагментация образцов в среде жидкого азота протекает более интенсивно (средний размер фрагментов в каждом сите меньше, число фрагментов больше). Обсуждается связь статистики фрагментации образцов с особенностями их механического поведения.

Образцы для исследования предоставлены компанией "Уралинтех", г. Екатеринбург. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 14-19-01173).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ ЭП679 НА ПЛАСТОМЕТРИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Гладковский С.В., Потапов А.И., Двойников Д.А., Лепихин С.В., Салихянов Д.Р.

Федеральное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e–mail: potapov_ai@list.ru.

В настоящее время высокопрочные мартенситно-стареющие стали (МСС) на Fe-Ni-Co-Mo, Fe-NiMo-Ti и Fe-Cr-Ni-Mo - основах [1] применяются в авиакосмической технике и специальном машиностроении для производства деталей и изделий, работающих в сложных температурно-силовых условиях нагружения. Интерес к процессам обработки МСС давлением и, в частности, к изучению их реологических свойств в широком температурном диапазоне [2] связан с оптимизацией режимов термомеханической обработки и возможностью получения в данных материалах методами интенсивной пластической деформации ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур.

Исследование сопротивления деформации σ_s мартенситно-стареющей стали ЭП679 при температурах холодной, теплой и горячей деформации (в интервале от 20 до 1100 °С) проведено на модернизированном пластометрическом комплексе ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН, включающим тиристорный регулируемый привод, датчики усилия, перемещения и систему сбора и обработки информации на базе ПЭВМ [3]. Выполнена осадка цилиндрических образцов диаметром d_o = 10±0,1 мм и высотой h_o = 14 ± 0,1 мм.

В результате проведенной работы было выявлено, что при прямом нагреве закаленных образцов в интервале температур испытания от 20 до 500 °С сталь ЭП679 обладает наибольшим сопротивлением деформации (σ_s = 1000 – 1200 МПа). В этом интервале для стали характерно интенсивное упрочнение на начальной стадии деформирования. Наиболее интенсивное упрочнение и высокий уровень сопротивления деформации наблюдаются при температуре 20 °С и 500 °С. Вместе с тем при температуре 500 °С по достижению степени деформации e = 0,2 – 0,3 происходит интенсивное динамическое разупрочнение металла, которое имеет место при всех изученных скоростях деформации. При выборе режимов обработки стали ЭП679 следует избегать ее деформирования в закаленном состоянии при температурах 20 – 500 °С при прямом нагреве, а также после упрочняющего старения при температурах близких к 500 °С в связи с повышенным сопротивлением деформации и возможностью хрупкого разрушения металла. Сопротивление деформации при температурах 300 – 700 °С может быть существенно снижено за счет предварительного нагрева стали до температуры 920 °С и последующего медленного охлаждения до температуры деформации. Горячую обработку давлением стали ЭП679 рекомендуется проводить при температурах 1000 °С и выше, что соответствует минимальному уровню сопротивления деформации.

Литература

1. Георгиев М. Н., Симонов Ю. Н. Трещиностойкость железоуглеродистых сплавов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 419 с.

2. Деформируемость стали 03Х11Н10М2Т в интервале температур 20 – 1100 ºС / Ю. Г. Векслер, Н. В. Звигинцев, И. П. Конакова, Г. В. Белова, Г. Н. Сунцев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1986. – № 8. – С. 74– 78.

3. Методика исследования сопротивления деформации на пластометрическом комплексе / А. И. Потапов, В. П. Мазунин, Д. А. Двойников, Е. А. Коковихин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т.76, № 9. – С.59–63.

ПРИБОРЫ И МЕТОД КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

Корх М.К., Ригмант М.Б., Ничипурук А.П.

ИФМ УрО РАН, д. 18, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация
e–mail: KorkhMK@imp.uran.ru, Rigmant@imp.uran.ru, Nichip@imp.uran.ru

Эксплуатационные свойства аустенитных и аустенитно-ферритных сталей в первую очередь зависят от их фазового состава. Помимо основной фазы аустенита в этих сталях может присутствовать строго регламентированное количество фазы феррита, которое напрямую влияет на такие свойства аустенитных сталей как жаропрочность, сопротивляемость воздействию агрессивных сред, механические свойства. В отличие от парамагнитного аустенита феррит является ферромагнетиком, то для контроля фазового состава (в данном случае – процентного содержания феррита) применяются приборы ферритометры, принцип действия которых основан на измерении магнитных характеристик исследуемого объекта. Современные модели ферритометров могут с удовлетворительной точностью давать информацию о процентном содержании феррита в исследуемом объекте даже при содержании феррита около 80%.

Однако при различных деформационных воздействиях неизбежных при изготовлении, ремонте или эксплуатации объектов из аустенитных материалов, особенно в сочетании с низкими температурами, в стали может накапливаться мартенсит деформации, возникающий вследствие распада аустенита. Наличие мартенсита деформации приводит к повышению хрупкости материала, резко меняет его магнитные свойства и во многих случаях является недопустимым для дальнейшей эксплуатации изделия.

Мартенсит деформации является более магнитожесткой фазой по сравнению с ферритом, имеет высокую остаточную намагниченность. В связи с этим неизбежна высокая погрешность при определении его процентного содержания с помощью приборов ферритометров чьи первичные преобразователи работают в интервале полей ± 300 А/см, а также с помощью приборов имеющих вихретоковые первичные преобразователи.

В данной работе рассматривается приборы, разработанные в ИФМ УрО РАН в отделе неразрушающего контроля. Они предназначены как для измерения магнитной проницаемости аустенитного материала в диапазоне μ от 1.001 до 1.1, в случаях, когда содержание в нем ферромагнитных фаз практически равно нулю, так и для измерения процентного содержания включений феррита и мартенсита деформации, при их содержании более 1%. Принцип работы приборов основан на регистрации с помощью датчика Холла полей рассеяния от магнитных включений в исследуемом материале.

Также авторами предложена установка и методика для раздельного определения процентного содержания феррита и мартенсита деформации по их магнитным свойствам при одновременном наличии этих фаз в составе аустенитной стали. Суть методики заключается в построении зависимостей дифференциальной магнитной восприимчивости (χ_{dif}) от намагничивающего поля (H) для трехфазных (аустенит-феррит-мартенсит) образцов и анализе полученных зависимостей, параметры которых пропорциональны содержанию ферромагнитных фаз в исследуемом материале.

Таким образом, разработанные в ИФМ УрО РАН приборы и методика позволяют в полной мере качественно и количественно определять фазовый состав аустенитных и аустенитно-ферритных сталей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-12-00001).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА НА АТОМНОМ УРОВНЕ ПРИ ЕГО НАГРУЖЕНИИ ПО СХЕМЕ ИМИТИРУЮЩЕЙ СВАРКУ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВИБРАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Коноваленко Ив.С.[1,2], Коноваленко Иг.С.[1,2], Дмитриев А.И.[1,2,3], Псахье С.Г.[1,2], Колубаев Е.А.[1,2]

[1]*ИФПМ СО РАН, д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*
[2]*Томский политехнический университет, д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация*
[3]*Томский государственный университет, д. 36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация*
e–mail: ivkon@ispms.ru

В настоящее время при промышленном производстве изделий различного назначения для создания неразъемных соединений используются различные виды сварки. Сварка трением с перемешиванием (СТП) является одной из перспективных современных технологий создания неразъемных соединений, применяемая, в том числе, для материалов с отличающимися свойствами. Физические процессы, происходящие в материале при СТП, характеризуется большим многообразием, взаимосвязанностью и быстротечностью реализующихся механизмов в месте нагружения. Особенно это актуально при проведении исследований на атомном уровне, когда пространственные и временные масштабы во многом ограничивают набор применяемых экспериментальных методик. В связи с этим методы компьютерного моделирования могут являться эффективным инструментом решения подобного класса задач. Отметим, что механоактивируемые процессы, неразрывно связаны с интенсивным формированием несплошностей, генерацией дефектов структуры различного уровня и переносом масс. С этой точки зрения наиболее предпочтительным является использование методов дискретного описания моделируемой среды.

В связи с вышесказанным целью работы является компьютерное изучение влияния дополнительного вибрационного воздействия на процессы интенсивного массопереноса в материале и оказываемое на него термомеханическое воздействие в условиях нагружения имитирующих процесс сварки трением с перемешиванием на атомном уровне. Расчеты проводилось методом молекулярной динамики. Исследовано влияние мощности (амплитуды) вибрационного воздействия прикладываемого к вращающемуся инструменту на процесс механического воздействия, оказываемого на материал в ходе СТП. Показано, что увеличение амплитуды вибрационного воздействия приводит к росту силы сопротивления, действующей на инструмент со стороны материала. При этом с увеличением значения амплитуды рост зависимостей силы сопротивления от времени замедляется. Анализ зависимостей кинетической температуры от времени для всей модели и ее локальной области вокруг инструмента, движущейся вместе с ним, показал, что с ростом амплитуды вибрационного воздействия скорость возрастания данных зависимостей сначала увеличивается, а затем становится равной нулю и зависимости выходят на некоторые постоянные значения. Эти значения также тем больше, чем больше амплитуда воздействия. Показано, что увеличение амплитуды вибрационного воздействия приводит росту глубины взаимного проникновения атомов каждого из кристаллитов в противоположный на 22 %.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № RFMEF I57814X0045).

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ, ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, ВЫНОСЛИВОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Вольнов К.М.*, Егоров Д.Ю.

ООО "Экситон тест" 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 11, литера А, Российская Федерация
e-mail: volnovkm@exiton-test.ru

Резонансные динамические машины для испытания материалов являются современным высокотехнологичным лабораторным оборудованием, призванным служить с целью выявления ресурса использования материала или компонента.

Такие высокочастотные испытательные машины для усталостных испытаний могут применяться к различным материалам и компонентам, при испытании которых на статическую нагрузку накладывается динамическая.

В современном мире любые конструкционные материалы подвергаются постоянному, как статическому, так и динамическому воздействию. У каждого конструкционного материала, находящегося под квазидинамическим нагружением, имеется свой ресурс службы, предел выносливости и предел прочности. Поэтому, при проектировании любых ответственных изделий и конструкций, испытываются, составляющие их, материалы, а иногда и целые составные конструкции.

Высокочастотные высокоточные резонансные динамические испытательные машины позволяют отработать миллионы циклов нагружения в относительно короткие сроки. Такие испытания позволяют построить кривые усталости, определить вязкость разрушения, скорость и характер распространения трещин, определить ресурс и выносливость материалов. А главное, расходы на проведение таких испытаний, за счет эффекта резонанса, удалось существенно снизить, примерно, до 10 раз, по сравнению с испытаниями на сервогидравлических машинах.

Литература

1. П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев, Сопротивление материалов. - 2007. – с. 330-376
2. SincoTec / The Power of Dynamic Testing. http://www.sincotec.de/en/

РАЗНОВИДНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ, ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, ВЫНОСЛИВОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Вольнов К.М.*, Егоров Д.Ю.

ООО "Экситон тест" 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 11, литера А, Российская Федерация
e-mail: volnovkm@exiton-test.ru

В современном мире любые конструкционные материалы подвергаются постоянному, как статическому, так и динамическому воздействию. У каждого конструкционного материала, находящегося под квазидинамическим нагружением, имеется свой ресурс службы, предел выносливости и предел прочности. Поэтому, при проектировании любых ответственных изделий и конструкций, испытываются материалы, из которых они будут состоять, а иногда и целые составные конструкции. Для проведения таких испытаний могут быть использованы, как резонансные электромагнитные и электромеханические машины, так и сервогидравлические или сервопневматические стенды. В зависимости от прикладных задач и особенностей материала, подбирается то или иное испытательное оборудование, которое при статическое нагрузке, прикладывает также динамическую.

Динамические испытательные машины позволяют отработать миллионы циклов нагружения, для моделирования реальных нагрузок и определения ресурса конструкционного материала и прогнозирования срока его службы, исключая или дополняя полевые натурные испытания.

Литература

1. П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев, Сопротивление материалов. – 2007. – с. 330–376
2. SincoTec / The Power of Dynamic Testing. http://www.sincotec.de/en/

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПРОКАТА В ПОТОКЕ ТРУБОПРКАТНОГО АГРЕГАТА

Швейкин В.П., Смирнов С.В., Нестеренко А.В.

Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: Shveikin60@mail.ru

Большинство изделий из металлов и сплавов, производимых методами обработки давлением, пластически деформируются в горячем состоянии, что позволяет снизить нагрузку на инструмент и повысить пластичность обрабатываемого материала.

Для формирования в готовом изделии оптимального комплекса прочностных, пластических и вязкостных свойств применяются различные способы.

Одним из наиболее наиболее экономичных и перспективных способов упрочнения является высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО). Она заключается в нагреве до температур однофазного аустенитного состояния, деформации после определенной выдержки в этой области и ускоренного охлаждения до температур ниже мартенситной точки $М_н$. Обязательной операцией является низкотемпературный отпуск.

Варьируя четыре основные параметра: степень, скорость, температуру деформации и длительность последеформационной паузы можно получить структурные состояния начиная от упрочненного в результате горячей деформации и заканчивая разупрочненным, являющегося следствием рекристаллизации.

Принципиальное отличие ВТМО от термической обработки с прокатного нагрева заключается в создании таких условий высокотемпературной пластической деформации и последующей закалки, при которых подавляется развитие рекристаллизационных процессов и создается особое субструктурное состояние, характеризующееся повышенной плотностью несовершенств и особым их расположением с образованием разветвленных субграниц- границ полигонов. Субграницы эффективно блокируют движущиеся дислокации. Кроме того, полигонизованная субструктура способствует перераспределению атомов растворенных компонентов в твердом растворе с образованием сегрегаций на субграницах. Это препятствует рассасыванию субструктуры при отпуске и также положительно влияет на прочностные и пластические характеристики.

После закалки с отпуском уже при температуре испытания около 0^0С наблюдается внутри и межзеренное хрупкое разрушение и интенсивное растрескивание по границам бывших аустенитных зерен. Термомеханическая обработка существенно изменяет характер разрушения сталей. В изломах углеродистых сталей, подвергнутых ВТМО, отсутствуют участки межзеренного или внутризеренного хрупкого разрушения; поверхность разрушения покрыта густой сеткой мелких равноосных ямок. Это характерно для вязкого внутризеренного механизма разрушения.

Положительное влияние развитой субструктуры проявляется и в случае циклического нагружения стали. Многочисленные малоугловые границы повышают энергозатраты на продвижение усталостной трещины и способствуют ее торможение. Об этом свидетельствует повышенное значение предела усталости термомеханически обработанной стали по сравнению с закаленной.

Благоприятное влияние ВТМО на сопротивление разрушению связано с измельчением кристаллов мартенситной структуры; наличием субструктуры, зубчатостью границ зерен аустенита; пониженной концентрацией вредных примесей и отсутствием сегрегаций примесей на границах зерен (т.к. примеси более равномерно распределены по субграницам внутри зерен); уменьшением динамических эффектов от ударов растущих мартенситных кристаллов аустенитного зерна из-за тормозящего влияния субструктуры.

В случае оптимального режима ВТМО в сталях повышается ударная вязкость, понижается порог хладноломкости (температура вязко-хрупкого перехода), растет сопротивление усталостному разрушению, понижается чувствительность к концентраторам напряжений, растут пластичность и временное сопротивление разрушению.

ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ КОМПОЗИЦИОННЫМ КОНСТРУИРОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ

Бледнова Ж.М., Русинов П.О.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», д. 2, ул. Московская, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация, e-mail: blednova@mail.ru

Цель исследования: оценка возможности и эффективности поверхностного модифицирования лопастей гребного винта (ГВ) материалами с эффектом памяти формы (ЭПФ) на основе анализа отказов и численного моделирования НДС и выработка рекомендаций по повышению отказоустойчивости композиционным конструированием поверхностных слоев.

Анализ отказов ГВ показал, что доминирующими деградационными процессами, вызывающими подавляющую часть отказов ГВ морских судов, являются отказы, вызванные образованием усталостных повреждений типа трещин (29,6 %), коррозионными (12,2 %) и эрозионными (13, 9%) поражениями. Для повышения отказоустойчивости ГВ, работающего в условиях циклического нагружения и воздействия агрессивной среды, предложена модель структуры и архитектуры поверхностной композиции, каждый слой которой имеет свое функциональное назначение: основа из термически обработанной стали имеет оптимальные прочностные характеристики; переходный слой никеля, имеющий неограниченную растворимость с основой и высокое сродство с материалом функционального слоя, обеспечивает надежную адгезию; функциональный слой состоит из чередующихся слоев многокомпонентных «интеллектуальных материалов» с ЭПФ на основе TiNi с изменяющимся структурно-фазовым состоянием, различной толщины дисперсности и прочностных характеристик, состав которых определяется требованиями, предъявляемыми к свойствам функционального слоя: прочности, сверхупругости или сверхэластичности, жаростойкости, износо-, коррозионностойкости или их совокупности. Обоснован выбор: многокомпонентных материалов с ЭПФ, входящих в состав композиции; технологии ее формирования; структуры и архитектуры композиции с целью повышения эксплуатационных свойств и жизненного цикла изделия.

Предложенная многослойная композиция «сталь - Ni– TiNiZr–TiNiCo», состоит из соединительного слоя и двух слоев из материалов с ЭПФ, которые в реальных эксплуатационных условиях находятся в разных фазовых состояниях и имеют существенно различающиеся характеристики прочности и пластичности. Наружный функциональный слой обладает повышенной несущей способностью в условиях коррозионно-усталостного нагружения, нижележащий слой из материала с ЭПФ обладает способностью торможения развивающихся трещин, повышенной релаксационной и демпфирующей способностью. Адгезионный слой обеспечивает надежное соединение с основой ($\sigma_{адг}$ =100-120 МПа) за счет кристаллохимического взаимодействия с материалом адгезионного и функционального слоев.

Для обоснования и выработки рекомендаций по составу композиции из материала с ЭПФ выполнен анализ НДС изделия с композиционным поверхностным слоем, сформированным высокоскоростным газопламенным напылением в защитной среде. Для численного анализа НДС лопастей ГВ выбран теплоход «*NS Concord*», принадлежащий ОАО «Новороссийское Морское Пароходство». Расчет НДС гребного винта с поверхностным слоем Ni– TiNiZr – TiNiCo показал, что композитный поверхностный слой приводит к снижению напряжений в наиболее опасной зоне лопасти. С учетом повышенных характеристик слоя TiNiCo сопротивлению износу и коррозии, а слоя TiNiZr в мартенситном состоянии повышенной пластичности и способности торможения трещин, композитный поверхностный слой способствует повышению отказоустойчивости ГВ. Коэффициент запаса прочности по пределу текучести составил 3,8÷8,4. Экспериментальные исследования образцов из стали 08Х14НДЛ с композитным поверхностным слоем при многоцикловом нагружении в морской воде показали повышение предела выносливости на 26 % и износостойкости в 3–3,2 раза.

Работа выполнена в рамках гранта при финансовой поддержке Российского научного фонда, Соглашение № 15-19-00202.

SOFTWARE FOR SEGMENTATION, STATISTICAL ANALYSIS AND MODELING OF SURFACE ORDERED STRUCTURES

Lytvynenko I.V. [1], Maruschak P.O.[1] *, Lupenko S.A. [1], Hats Yu.I. [1],
Menou A. [2], Panin S.V. [3]

[1]*Ternopil National Ivan Pul'uj Technical University, Ternopil, 46001, Ukraine*
[2]*International Academy of Civil Aviation, Casablanca, Morocco*
[3]*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia*
[*] *e-mail:* laboratory22b@gmail.com

The development of modern information systems for the automated analysis and prediction of the deformation behavior of fracture of new generation materials and nanocoatings is an important scientific problem. It is this that allows evaluating the heterogeneity of the stress-strain state of the system, contributes to the intensification of technical diagnostics of the modified surface condition, improves reliability of the analysis

This paper is dedicated to the development of the software package (software system) for the problems of segmentation, statistical analysis and modeling of relief formation processes. Also, an approach is proposed to the formation of the choice of diagnostic features in order to construct algorithms for diagnosing surface condition of plastically deformed materials.

The software tool allows implementing the following functions:

- pre-processing of the morphological relief data within the test length;
- segmentation of morphological cycles of signal implementation;
- measurement of the discrete rhythm function;
- definition of statistical estimates of stochastic characteristics of the signal (mathematical expectation and variance, autocorrelation function and covariance function within and outside the cycle);
- modeling of relief formation process;
- definition of statistical estimates of stochastic characteristics of the signal (mathematical expectation and variance, autocorrelation function and covariance function within and outside the cycle);
- implementation of the approach to the construction of diagnostic spaces for the problem of developing the methods of automated diagnostics.

Theoretical approach and program implementation of the relief formation processes based on the mathematical model of a cyclic random process are proposed. Its efficacy is proven by the examples of its application to the solution of problems of segmentation and statistical analysis of the data on the nanotitanium surface condition subjected to a high-energy impact and the surface of the statically deformed aluminum alloy. They are the mathematical basis for further prediction of the surface condition of these materials based on the analysis of the local area.

The method of segmentation, statistical analysis and modeling of the relief formation signal is applied, which can be useful in the process of morphoanalysis. It allows increasing the degree of homogeneity of the averaged readings of morphostructures and removing the unwanted blurring effect of statistical estimates of the analyzed signal characteristics.

Software tools are developed for processing the registered signal of the relief formation and conducting simulation experiments for diagnostic systems using computers.

In further studies it is planned to perform expansions of two-dimensional estimates (autocorrelation function and covariance function within and outside the cycle) and see how sensitive is the method for obtaining diagnostic signs in the form of expansion coefficients in the Chebyshev series for the problems of creating diagnostic spaces and conducting automatic diagnostics of the material surface condition.

УДК 621.746+621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛОС ИЗ СТАЛИ И АЛЮМИНИЯ НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Лехов О.С.[1], Билалов Д.Х.[2]

Российский государственный профессионально-педагогический университет, д. 11, ул. Машиностроителей г. Екатеринбург, 620012, Российская Федерация
e-mail: [1]MXlehov38@yandex.ru, [2]master_ddd@mail.ru

Для повышения качества листовой металлопродукции может быть эффективно использована компактная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, которая по технико-экономическим показателям превосходящая лучшие зарубежные аналоги.

Совмещенный процесс непрерывного литья и деформации включает стадии образования затвердевшей оболочки с жидкой фазой в кристаллизаторе, формирования стенками-бойками полосы из оболочки с жидкой фазой, циклической деформации стенками-бойками затвердевшей полосы и калибровки листа. Таким образом, на входе в сборный кристаллизатор заливается расплав металла, а на выходе из сборного кристаллизатора получаем деформированный и калиброванный лист высокого качества.

Высокое качество металлопродукции обеспечивается:

- получением мелкозернистой и однородной структуры металла вследствие интенсивного перемешивания жидкого металла и обжатия стенками-бойками полосы с высокой степенью деформации;
- исключением продольной разнотолщинности листа вследствие узкого температурного интервала деформации;
- высокой точностью листа и хорошим качеством его поверхности вследствие наличия калибрующего участка на стенках-бойках и хороших условий подачи эмульсии в очаг деформации.

Для оценки качества листа проведено исследование напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации. Результаты получены решением задачи теории упруго-пластичности методом конечных элементов в объемной постановке. Для расчета использован пакет ANSYS. Полученные результаты свидетельствует о благоприятной схеме напряженного состояния металла в очаге деформации с преобладанием высоких сжимающих напряжений. Как следует из эпюр напряжений, металл при деформации находится практически в условиях всестороннего сжатия. Эти особенно важно при обработке непрерывнолитого металла с целью получения листов высокого качества.

Проведено исследование структурообразования при получении листа из алюминия на опытной установке непрерывного литья и деформации. Установлено, что лист имеет комбинированную структуру, состоящую из текстурированных кристаллов в виде пластин в основе и мелких зерен в поверхностных слоях.

При исследовании динамики структурообразования по длине очага циклической деформации при получении листа из стали 45 установлено, что циклическая деформация стенками-бойками затвердевшего металла с высокой степенью обжатия позволяет существенно изменить литую структуру стали и на выходе получить лист с однородной и мелкозернистой структурой.

ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., 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

Проведены исследования влияния напряженного состояния на предельную пластичность технически чистого алюминия при повышенной температуре. Величина предельной пластичности количественно может быть охарактеризована накопленной степенью деформации к моменту разрушения. В качестве характеристик напряженного состояния использовались безразмерные инвариантные параметры: показатель напряженного состояния k и показатель вида напряженного состояния Лоде – Надаи μ_σ. Совокупность показателей k и μ_σ однозначно характеризует напряженное состояние при пластической деформации, кроме того, являясь безразмерными, они позволяют сопоставлять напряженное состояние материалов с различным уровнем прочностных свойств. Для исследования предельной пластичности выполнены испытания на растяжение гладких цилиндрических образцов и образцов с кольцевой выточкой, испытания на растяжение и сжатие образцов типа «колокольчик», испытания по выдавливанию донышка толстостенного стаканчика. Напряженно – деформированное состояние в процессе испытаний образцов оценивали по результатам моделирования испытаний методом конечных элементов. По результатам испытаний получена диаграмма предельной пластичности, которая может быть использована в моделях механики поврежденности для прогнозирования разрушения исследованного материала в процессах пластического формоизменения.

SIZE-DEPENDENT STRENGTHENING OF PARTICLE-REINFORCED COMPOSITES SIMULATED BY A COUPLED THERMO-MECHANICAL MODEL

Zhu B., Lei M.K.*

Surface Engineering Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
**e-mail: surfeng@dlut.edu.cn*

Recent experiments show a significant particle size effect in the particle-reinforced composites. Several theoretical models are used to describe the observed effects. The size-dependent strengthening of particle-reinforced composites is usually simulated based on the unit-cell model at relatively low particle volume fractions. However, the residual stresses and particle interaction are ignored in these models, which may be important in determining the tension-compression performance in the composites. In this work, a two-step simulation procedure and a corresponding computational approach are developed for modeling the particle-reinforced composites comprising several inclusions embedded within the metal matrix to account for the residual stresses and particle interaction. The geometrically necessary dislocations history is considered in the model through a mismatch in the coefficients of thermal expansion during the preparation cooling process as in a thermal quenching. The enhanced strength and residual stresses are obtained in the matrix of the particle-reinforced composites around the particles. The model involving the residual stresses and geometrically necessary dislocations is further subjected to the mechanical loading. The overall mechanical response of particle-reinforced composites exhibits a significant size-effect, including the tension-compression performance dependent on the residual stresses.

A temperature-dependent parametric variational constitutive relation is used to handle the particle size-effect in the model of the particle-reinforced composites. The corresponding computational approach is successfully performed in the two-step simulation procedure based on the mechanism-based strain gradient plasticity (MSG) theory combining with parametric quadratic programming technique. The constitutive relation is conformed in a unified formula with conventional J2 flow theory, which makes it comparatively suitable to implement in a conventional elastic-plastic finite element program. Compared with the conventional approach for MSG, the proposed one does not depend on iteration, whereas on the base exchanges in the solution of a standard quadratic programming problem. The proposed approach has no tedious iterative procedures and good convergence behavior. Numerical results demonstrate the validity of the proposed computational approach using the temperature-dependent parametric variational constitutive relation, and the primary results are the following: (i) The uniaxial tensile stress-strain curve obtained from the finite element analysis is in good agreement with the experimental data. (ii) The tension-compression asymmetry in the particle-reinforced composites exists for the coupled thermo-mechanical model. (iii) The extended mechanism diagram and an empirical expression for enhanced strengthening of the composites depend on the particle size and the particle volume fraction are presented with different particle arrangements.

MICROSTRUCTURE DEPENDENCE OF MECHANIC BEHAVIOR OF AN ALLOY 690

Pan X.M., Zhu X.P., Zhang Y.Y., Lei M.K.*

Surface Engineering Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
e-mail: surfeng@dlut.edu.cn

Alloy 690 has good formability, high strength and excellent corrosion resistance and therefore it achieves extensive use in applications such as combustion systems, turbines and nuclear reactors under a complex combination of elevated temperatures, high stress, and hostile environmental conditions. If Alloy 690 has not proper microstructure, the severe conditions cause material fasted-degradation and even lead to catastrophic failure during service operation. For example, excellent corrosion resistance is seriously influenced by the carbide morphology and chromium concentration near the grain boundary.

In order to design optimal Alloy 690 structural components, particularly when they are to be applied in critical conditions or are intended for use under arduous operating conditions, a thorough understanding of the impact properties and fracture characteristics as a function of microstructure is quite necessary. As-received Alloy 690 has a composition (in wt.%) of 60.01%Ni, 29.05%Cr, 10.24%Fe, 0.016%C, 0.22%Mn, 0.22%Si and 0.24%Cu in this work. The heat treatment, which consisted of two types of solution annealing for carbide dissolution and thermal treatment for carbide precipitation, respectively, were conducted at various temperatures and periods in order to investigate different carbide morphology specimens. Metallographic specimens were electrolytically etched in 6% ethanedioic acid solution at 4 V for 60 s. Cylindrical specimens of height 5 mm and diameter 5 mm were machined with an EDM device for mechanic behavior research. Low-strain-rate compression tests were carried out using an MTS 810 machine at strain rates of 0.005, 0.05 and 0.5 s^{-1}. Meanwhile, dynamic impact tests were performed with a split-Hopkinson pressure bar apparatus at strain rates ranging from 5.3×10^3 to 8.8×10^3 s^{-1}. Scanning electron microscopy is used to reveal the microstructure features and fracture mechanisms.

The experimental results show: (i) When the Alloy 690 was solution annealed at 1180° C for 0.5 h (SA at 1180 ^{o} C), the pre-existing carbides were almost dissolved in matrix and the grain size was larger than 150 □m with 12 percent. Solution annealing affects the grain growth of the Alloy 690, whereas the thermal treatment at lower temperature barely changes the grain size. Followed the thermal treatment, the continuous linear carbides were precipitated in the grain boundary heated at 710° C for 10 h (TT at 710° C). The discontinuous granular carbides were observed in the grain boundary heated at 750° C for 10 h (TT at 750° C). (ii) The Alloy 690 strain rate sensitivity is very weak at low strain rates from the compressive flow stress-strain response curves. Carbide precipitation increased the working hardening rate of the specimens. (iii) No fracture occurred in impact tests for the SA at 1180° C specimens with a lot of slip line in the matrix by scanning electron micrograph observation. The SA+TT at 750° C specimens exhibit the higher flow stress than that of the SA+TT at 710° C ones. The former with inter-granular facets seems to be more brittle than the latter with shear dimples on the fracture surface.

EFFECT OF η-PHASE PRECIPITATES ON DEFORMATION NANOSTRUCTURING AND HARDNESS OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOY

Krymskiy S.V., Sitdikov O.Sh., Markushev M.V.

Institute for Metals Superplasticity Problems Russian Academy of Sciences, 39 Khalturin St., Ufa, 450001, Russia, e-mail: mvmark@imsp.ru

Effect of preliminary quenching and further artificial aging at 170^0C with exposure from 1 to 10 hours, on deformation nanostructuring and hardness of a 7xxx type aluminum alloy with Sc and Zr additions, was analyzed. The samples with diameter 20 mm and thickness 1 mm were cut from semi-continuously cast and conventionally homogenized ingot, heat treated and then deformed by high-pressure torsion (HPT) to 10 revolutions at a room temperature under pressure of 6 GPa.

Transmission electron microscopy analysis has shown that in addition to the so-called dispersoids - aluminides of Zr and Sc formed at homogenization of the ingot, aging resulted in precipitation and coarsening of the main strengthening η(MgZn) - type phases. Consequently, prior HPT quenching and aging provided the structures with uni- and bimodal distribution of precipitates, differed by their size, density and nature.

It has been found that nanocrystalline structure with a mean crystallite size of ~80 nm was formed in the preliminary quenched material only, which had compact and predominantly coherent aluminides of transition metals ~20 nm in diameter, homogeneously distributed in material before HPT. In contrast, continuous dynamic recrystallization, being the main nanostructuring mechanism in such dispersoid-containing supersaturated by main alloying elements aluminum solid solution, was completely inhibited in the pre-aged samples. The latter was conditioned by the precipitation at aging of plate-like η-type phases ~5-15 nm long, having the densities of one order higher, than that of dispersoids. As a result of the alloy matrix nanostructuring, the preliminary quenched alloy demonstrated much higher hardness than the pre-aged ones, despite of their strong dispersion strengthening before HPT.

The effects of dispersed phases of different origin on the alloy nanostructuring, as well as the nature of its structure-property relations observed, are discussed.

It has been concluded that upon processing of heat-hardenable aluminum alloys for imparting into them the nanocrystalline structure, the parameters of heterogeneity of their initial structure have to be surely considered. For this purpose, by analogy to well-known processing routes of fine-grained products (with the grain size of 1-10 micron), it is necessary to develop the principles of optimization of heterogeneity of the alloys structure, as well as to show and prove methods of its statement and control. These principles should demand not only novel specification of parameters of structure heterogeneity, but also their development, taking into account the nature of deformation nanostructuring mechanisms, efficiency and potential of their industrial applications for alloys of commercial and perspective compositions.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЙ-ГРАФЕНОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Елшина Л.А.[1], Мурадымов Р.В.[1], Вичужанин Д.И.[2], Смирнова Е.О.[2]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук, 20, ул. Академическая, Екатеринбург, 620990, Российская Федерация, e-mail: yolshina@ihte.uran.ru*

[2] *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*

Разработан новый метод создания композитных металлических материалов на основе алюминия, содержащий до 5 мас.% модифицирующих углерода в виде графеновых пленок толщиной 1-3 монослоя, равномерно распределенных в алюминиевой матрице, в галогенидном расплаве при температурах 700-800°С. Синтез наночастиц углерода происходит непосредственно в расплавленной алюминиевой матрице без необходимости отдельной стадии синтеза и выделения углеродных наноматериалов, что уменьшает трудоемкость получения алюминиевых композитов с высоким содержанием углерода. Получаемые таким методом алюминий-графеновые металлические композиты отличаются равномерным распределением по объему металла чешуек графена размером от 100 нм до 100 мкм, что приводит к высокой однородности свойств композитов.

Температура плавления алюминий-графеновых композитов точно соответствует температуре плавления исходного алюминия. Наличие отдельных, равномерно распределенных в объеме алюмиия фаз графена в алюминии подтверждено спектроскопей комбинационного рассеяния. Не обнаружено образования карбида алюминия, ухудшающего обычно коррозионную стойкость алюминий-углеродных композитов.

Твердость алюминий-графенового композита практически в 2 раза выше, чем у исходного алюминия, аналогичным образом увеличивается и его модуль упругости. Введение графена в алюминиевую матрицу увеличивает также тределы текучести и прочности по сравнению с исходным металлом, а также относительное удлинение, что и делает возможным получение тонкой алюминиевой проволоки.

	Al	Al-1% graphene	Al-2% graphene
Температура плавления	662^0C	660^0C	658^0C
Плотность, г/см^3	2.7	2.5	2.4
Твердость, HV 2000 mH	16.72	45.32	57.19
Модуль упругости, (GPa)	60.61	82.48	87.93
Предел текучести, $\sigma_{0.2}$, МПа	41.46	47.61	48.1
Предел прочности, σ_B, МПа	61.87	80.4	93.78
Относительное удлинение , δ_5, %	13.04	20.6	36.0

Алюминий-графеновые металлические образцы при хранении их на воздухе в течение долгого времени (1.5-2 года) остаются блестящими, не покрываются оксидной пленкой. Алюминий-графеновые металлические композитные материалы затем могут быть переплавлены для литья деталей различной формы без потери исходных свойств полученного композита, а также прокатаны в тонкую фольгу и вытянуты в проволоку диаметром до 0.2 мм.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-0801011 с использованием оборудования ЦКП «Состав вещества» ИВТЭ УрО РАН и «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НЕЙТРОНОЗАЩИТНЫЕ ЛИСТОВЫЕ Al/B_4C-КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Гладковский С.В.[1], Каманцев И.С.[1], Кутенева С.В.[1], Веселова В.Е.[1], Казеев В.Г.[2], Суворов Е.А.[2]

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация*
[2]*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», г. Снежинск, Российская Федерация*
e-mail: gsv@imach.uran.ru

В последние годы в мировой ядерной энергетике наблюдается тенденция к использованию тепловыделяющих сборок с увеличенным уровнем выгорания и начального обогащения, что в свою очередь приводит к возрастанию радиационной активности отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и более высокому уровню его остаточного выделения. В связи с этим актуальной задачей отечественного атомного машиностроения является разработка двухцелевых транпортно-упаковочных комплектов (ТУК) нового поколения для транспортирования и хранения ОЯТ для реакторных установок ВВЭР-1000.

В рамках проведенных в ИМАШ УрО РАН совместно с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина» исследований разработана технология получения перспективных листовых нейтронозащитных бороалюминиевых композитов на основе метода горячей прокатки. В атомной промышленности в настоящее время для изготовления элементов конструкции ТУК широко используются боросодержащие стали, которые по ряду показателей (степень нейтронной защищенности, удельный вес, теплофизические свойства) существенно уступают предлагаемым Al/B_4C-композиционным материалам. Предложенные методика и режимы получения листовых бороалюминиевых композитов (боралей) методом горячей прокатки позволяют объединить в едином технологическом цикле процессы компактирования исходной смеси порошков Al и B_4C и нанесения внешних плакирующих слоев из сплава АМг3. На основании проведенных исследований методом горячей прокатки на стане Дуо/Кварто ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН, а также в условиях промышленного производства получены опытные образцы листовых Al/B_4C- композитов с плакирующими слоями из сплава АМг3 шириной до 250 мм, толщиной до 10 мм и длиной до 1050 мм. Содержание карбида бора в защитном Al/B_4C слое составляло 20, 25 и 30 вес.%. Испытания на одноосное растяжение и ударный изгиб показали, что в зависимости от состава порошковой смеси, толщины плакирующих слоев, а также от дисперсности и микростроения порошковых частиц карбида бора механические свойства изученных композитов при комнатной температуре варьируются в пределах $\sigma_{0,2}$ = 90-235 МПа; σ_B = 95-270 МПа; δ = 2- 5%; ψ = 4-16 %; KCV = 20-130 кДж/м^2. При этом наиболее высокий уровень прочностных свойств при достаточной пластичности ($\sigma_B \approx 270$ МПа; $\sigma_{0,2} \approx 235$ МПа; $\delta \approx 3\%$; $\psi \approx 11\%$) получен на Al/B_4C-композите с наноразмерными порошковыми частицами карбида бора. По уровню ударной вязкости при T = 20 °C композиты сопоставимы с алюминиевыми сплавами повышенной прочности (KCV ≈ 100 кДж/м^2). Впервые методами механики разрушения определены параметры трещиностойкости новых нейтронозащитных материалов при различных видах нагружения, изучена тонкая структура внешних и центральных слоев композита, а также особенности микростроения их изломов. Получены данные сравнительных дилатометрических исследований в интервале температур 20-600°C чистого алюминия и центрального слоя Al/B_4C- композита и результаты измерения важнейших теплофизических свойств (теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность), свидетельствующие о возможности эффективного применения перспективных нейтронозащитных материалов в элементах конструкции ТУК.

ВЫБОР ХИРУРГИЧЕСКОЙ ТАКТИКИ ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДНЕЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПЛЕЧЕВОГО СУСТАВА У ПАЦИЕНТОВ С ВЫСОКОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Чертков А.К., Обухов И.А., Баженов А.В., Панченко Е.Н., Рошаль С.М.

Уральский Государственный Медицинский Университет МЗ РФ, г. Екатеринбург, Российская Федерация
5 Военный Клинический Госпиталь Внутренних Войск МВД России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Актуальность. Возрастающая популярность активного образа жизни, занятий экстремальными видами спорта приводит к увеличению числа травм в популяции. Среди всей массы травм вывих плеча занимает одно из первых мест. К сожалению, частота рецидивов после первичного вывиха плеча, даже при правильной тактике лечения, достигает 60-70%, а по данным некоторых авторов и до 100%. Активное развитие артроскопических технологий, поддерживаемое, а скорее стимулируемое многочисленными медицинскими компаниями, привело к масштабному внедрению артроскопической операции Банкарта при хронической нестабильности плечевого сустава. Неправильная оценка степени повреждения костных и мягкотканых структур, стабилизирующих плечевой сустав, приводит к рецидиву вывиха после восстановления обычной для пациента двигательной активности.

Цель исследования – уточнить показания к артроскопической или открытой стабилизации плечевого сустава у пациентов с высокой двигательной активностью.

Материалы и методы. В 5 ВКГ ВВ МВД России с 2012 по 2015гг. выполнено 72 операции по поводу хронической передненижней нестабильности плечевого сустава. Оперировано 72 пациента – 58 (80,6%) мужчин и 14 женщин (19,4%). Средний возраст оперированных пациентов составил 36,5±4,3 лет. Срок от момента первичной травмы составил 3,1±0,7 лет. Три пациента были уже ранее оперированы по поводу привычного вывиха плеча, всем им выполнялись внесуставные вмешательства на переднем отделе плеча. Всем пациентам перед операцией выполняли компьютерную и магнитно-резонансную томографию. При этом оценивали степень повреждения передней и нижней части суставной губы, размеры костного дефекта гленоида (Банкарта) и заднего края головки плечевой кости (Хилл-Сакса). При костном дефекте гленоида менее 20% (в сравнении со здоровым суставом) и небольшом дефекте заднего края головки плечевой кости принимали решение об артроскопической стабилизации плечевого сустава при помощи якорных фиксаторов (операция Банкарта). Во всех остальных случаях выполняли открытую стабилизацию плечевого сустава путем костно-пластического замещения дефекта передненижней части гленоида клювовидным отростком с фиксацией винтами (операция Латарже). Мы выполнили 52 (72,2%) операции Банкарта и 20 операций Латарже (27,8%).

Результаты и обсуждение. Через один месяц после операции были осмотрены все 72 (100%) пациента, через три месяца – 70 (97,2%), через шесть месяцев – 62 (86,1%), через год – 56 (77,8%), через два года – 51 (70,8%), через три года – 47 (65,3%) пациентов. Максимальный срок наблюдения составил 40 месяцев. У одного (1,4%) пациента через год после операции Банкарта произошел рецидив вывиха плеча при адекватной травме. У 15 (20,8%) пациентов через год после операции сохранялось ощущение неустойчивости сустава при отведении и наружной ротации плеча. Следует отметить, что все эти пациенты были оперированы артроскопически и имели пограничную площадь костного дефекта гленоида. У двух (2,8%) пациентов после операции Латарже ограничение отведения достигало 15º.

Таким образом, выбор вида оперативного вмешательства базировался на степени повреждения костных и мягкотканных структур плечевого сустава, а также степени физической активности и уровня функциональных запросов пациента. На наш взгляд, не следует расширять показания к артроскопической технике стабилизации плечевого сустава у пациентов с высокими функциональными запросами, так как возрастает вероятность рецидива нестабильности. Открытая операция Латарже является эффективной хирургической техникой при лечении хронической передненижней нестабильности плечевого сустава у пациентов с большим костным повреждением Банкарта и высокими функциональными запросами.

ОТДАЛЕННЫЕ (15-ЛЕТНИЕ) РЕЗУЛЬТАТЫ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИЯ ПОЯСНИЧНЫХ ДИСКОВ ДИНАМИЧЕСКИМИ И РИГИДНЫМИ КОНСТРУКЦЯМИ

Чертков А.К., Чертков К.А., Баженов А.В.

Уральский Государственный Медицинский Университет МЗ РФ, г. Екатеринбург, Российская Федерация
5 Военный Клинический Госпиталь Внутренних Войск МВД России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Актуальность. Одной из наиболее актуальных проблем в современной хирургической вертебрологии является повышение эффективности лечения пациентов остеохондрозом нестабильных поясничных сегментов с применением вентральных и дорсальных динамических конструкций. В работе оцениваются отдаленные результаты эндопротезирования дисков у пациентов с нестабильностью сегментов в сочетании с дискорадикулярными конфликтами.

Материал и методы лечения. Операции по декомпрессии невральных структур центрального и радикулярного каналов с эндопротезированием поясничных дисков функциональными (группа А), нефункциональными (группа Б) и комбинированными (группа В) авторскими конструкциями с 1996 по 2002 год проведены у 167 больных с остеохондрозом поясничного отдела позвоночника с нестабильностью позвоночных (ПДС) двигательных сегментов, причем в 75% случаев в сочетании с дискорадикулярными конфликтами. Группа А включала 67 пациентов, а группу Б составили 70 пациентов и группу В – 30. Во всех случаях применялся вентральный ретроперитонеальный доступ по В.Д. Чаклину. Клинические, рентгенологические, биомеханические результаты эндопротезирования оценивались через десять и пятнадцать лет по шкалам VAS, OSVESTRY, SF-36. Определялась динамика симптомов двух ведущих клинических синдромов: вертебрального и радикулярного, а также рентгенологический, биомеханический и социальный статус пациентов.

Результаты и обсуждение. К сожалению, в отдаленном периоде продолжали жаловаться на периодические боли в поясничном отделе позвоночника при статической и динамической нагрузке каждый пятый из оперированных пациентов. Корешковые боли в нижних конечностях, возникающие после физической нагрузки, отмечали семь из 167 оперированных больных, в то время как до операции такие боли диагностированы у 144 пациентов. Снижение силы в мышцах нижних конечностей отмечали по семь пациентов из каждой группы после операции, в то время как в дооперационном периоде клинически и электронейромиографически диагностированы парезы мышц сгибателей и разгибателей стопы и пальцев легкой степени с моторным и сенсорным корешковым дефицитом от 64 до 87% случаев. При интегральном обследовании клинически и параклинически через 15 лет (КТ, МРТ, ЭНМГ, ФРГ) после операции 21 (12,6%) не удовлетворены результатами операций в связи с возобновлением болевого синдрома. Как правило, основной причиной возобновления болей в поясничном отделе позвоночника являлся спондилоартроз (77%), с характерной клинической окраской и рентгенологическим подтверждением. При этом движения в оперированных сегментах через десять лет после операций сохранены в 47% случаев, а через 15 лет у 20 % пациентов. В большинстве случаев динамическая конструкция через 15 лет после имплантации выполняла роль ригидной стабилизирующей опоры, обеспечивающей стабильность в сегменте. Осложнения операций протезирования дисков динамическими и ригидными протезами (нестабильность конструкции, миграция элементов протеза, редукция ядра протеза, остеолизис в контактных зонах) в нашей практике наблюдались у 7 (2,8%) пациентов.

Заключение. Таким образом, адекватная вентральная декомпрессия корешков в позвоночном и радикулярном каналах, дифференцированное применение эндопротезов функционального и нефункционального типов (Б, В) для восстановления стабильности в ПДС позволили восстановить их функцию в абсолютном большинстве (97 %) анализируемых случаев в течение первых 7 лет с последующим приобретением ими «роли» ригидной стабилизируюшей опоры. Применение динамических вентральных конструкций при замещении несостоятельных люмбальных дисков имеет несомненное клиническое преимущество перед ригидной фиксацией в лечении пациентов молодого и среднего возраста с дегенеративным поражением сегментов поясничного отдела позвоночного столба.

РОЛЬ ТКАНЕВОЙ ОКСИМЕТРИИ И ЦИФРОВОЙ ДИНАМОМЕТРИИ В ПРОФИЛАКТИКЕ РАЗВИТИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МЕЖОСТИСТЫХ ФИКСАТОРОВ

Чертков К.А., Кутепов С.М., Чертков А.К., Баженов А.В.

Уральский государственный медицинский университет МЗ РФ, г. Екатеринбург, Российская Федерация
5 Военный клинический госпиталь внутренних войск МВД Кафедра травматологии и ортопедии, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В работе представлены результаты интраоперационной тканевой оптической оксиметрии при имплантации межостистых фиксаторов у 17 пациентов с нестабильностью в поясничных позвоночных двигательных сегментах (ПДС) с применением динамометрического цифрового устройства. Целью исследования являлась разработка профилактики нарушений васкуляризации в костных структурах, как базового условия для успешной остеоинтеграции. В результате исследования определены параметры безопасной компрессии (25-27Н/М) межостистых отростков фиксирующими устройствами при имплантации стабилизирующих фиксаторов.

Цель исследования: создание технологии имплантации межостистых фиксаторов без нарушения васкуляризации костной ткани под контролем локальной и системной сатурации.

Материал и методы исследования. Оксиметрические исследования ткани остистых отростков в контактных зонах с имплантатами проведены у 17 пациентов (средний возраст 37±2,7) при операциях стабилизации поясничных сегментов межостистыми фиксаторами динамического и ригидного типов (патент РФ на полезную модель №128481, патент на промышленный образец №87386). Все пациенты оперированы по поводу прогрессирующего дегенеративо-дистрофического процесса в люмбальных сегментах позвоночного столба с развитием дискорадикулярных конфликтов и нестабильности. Непосредственными показаниями к оперативному вмешательству являлись радикулярный и вертебральный болевые синдромы, резистентные к медикаментозной и физиотерапии. Для оценки локального насыщения кислородом остистых отростков применялся комплекс «ЛАКК-М», который обеспечивал одновременные измерения перфузии ткани кровью, сатурации гемоглобина кислородом (SO_2) и объём фракции гемоглобина (Vr) в зондируемой области, сравнивая локальную сатурацию с изменениями церебральной сатурации по показателям тканевого оксиметра FOR-SIHT (M2000, USA). Компрессионные нагрузки при фиксации протезирующего динамического устройства контролировались динамометрическим ключом с цифровой индикацией момента силы при закреплении межостистого фиксатора.

Результаты и обсуждение. Достоверное снижение SpO_2 ($p \leq 0,05$) в костной ткани при имплантации межостистого фиксатора подтверждало гипотезу о том, что при избыточной компрессии остистого отростка имплантатом происходило изменение газообмена, снижение потребления тканью кислорода, что служило развитием ишемии костной ткани с последующими изменениями минерального обмена в нем и процессов остеоинтеграции. При избыточной компрессионной нагрузке (более 30 Н) фиксирующими элементами имплантата на костную ткань межостистых отростков оксиметрические показатели неуклонно снижались, что указывало на необходимость ограничения компрессии на костную ткань до 25-27Н. При оксиметрических показателях 65-70% с ткани отростков в течение 13 – 15 минут наблюдали стабильные значения показателей кислорода, что и служило основанием для окончательного закрепления межостистого фиксатора при максимальном моменте силы от 25 до 27 Н/м.

Заключение. Учитывая небольшой клинический материал и малые сроки наблюдения за пациентами с имплантированными фиксаторами под оксиметрическим контролем, мы вправе, с профессиональной осторожностью, сказать, что имплантация стабилизирующих ригидных и динамических межостистых фиксаторов должна осуществляться под интраоперационным контролем оксиметрических показателей в зонах контакта имплантата с костными элементами при компрессионном воздействии на костную ткань межостистых отростков с динамометрическим ключом, что несомненно является современным базовым элементом профилактики развития нестабильности фиксирующих конструкций.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РИГИДНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ФИКСАТОРОВ У ПАЦИЕНТОВ С ДЕГЕНЕРАТИВНЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ ПОЗВОНОЧНИКА

Чертков А.К., Баженов А.В., Чертков К.А.

Уральский Государственный Медицинский Университет МЗ РФ, г. Екатеринбург, Российская Федерация
5 Военный Клинический Госпиталь Внутренних Войск МВД России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Актуальность. Стабилизирующие операции являются важнейшим моментом патогенетически обоснованного лечения дегенеративных поражений позвоночника. До недавнего времени спондилодез являлся единственным и практически безальтернативным способом лечения остеохондроза. Однако, устраняя нестабильность пораженного позвоночного сегмента, ригидный спондилодез может приводить к функциональной перегрузке соседних сегментов и их ускоренной дегенерации. Новым подходом к решению проблемы хирургического лечения остеохондроза являются исследования по применению динамической фиксации, которая позволяет предотвратить дегенерацию соседних сегментов.

Цель исследования – анализ отдаленных клинических результатов у пациентов с остеохондрозом, оперированных с применением ригидных и динамических фиксаторов.

Материалы и методы. Методами анкетирования и клинического осмотра с рентгенографическим, электронейромиографическим исследованиями через 2 года после операций обследованы 38 пациентов после протезирования поясничных сегментов динамическими и ригидными конструкциями. Для оценки интенсивности болевого синдрома использовали визуально-аналоговую шкалу (ВАШ). С помощью электронейромиографического исследования оценивалась патологическая спонтанная активность в заинтересованных миотомах по количеству потенциалов фибрилляций и фасцикуляций в единицу времени по Коуэну и Брумлику.

Все пациенты оперированы по поводу нестабильности в поясничных позвоночных двигательных сегментах (ПДС) в сочетании с дискорадикулярными конфликтами. Анализ результатов лечения проводился в двух группах. В группе А 17 пациентов – мужчины, средний возраст 39,7±3,2 года. Всем пациентам было проведено удаление грыжи диска и проведена фиксация сегмента ригидной транспедикулярной конструкцией. Группу Б составил 21 пациент – мужчины, средний возраст 37,8±4,5 года. После декомпрессии корешков всем пациентам был установлен динамический межостистый фиксатор.

Результаты. Клиническая картина в основном была представлена люмбоишиалгиями, корешковые боли без люмбалгии отмечены только в группе А (5,2%). Вертебральный болевой синдром зарегистрирован в 17,6% в группе А и в 9,5% в группе Б. По ВАШ в группе А болевой синдром составил 3,4 балла, в группе Б 1,4. Патологическая активность в миотомах установлена в 17,6% в группе А и в 4.8% в группе Б. В группе Б явлений нестабильности в оперированном и смежных сегментах позвоночника не было. В результате межостистой динамической стабилизации увеличивалась высота межпозвонкового диска в задних и, в меньшей степени, средних отделах, при неизменившейся высоте передних отделов. Угол поясничного лордоза, общий объем движений в поясничном отделе позвоночника после операции не изменялся. Рентгенологических признаков резорбции костной ткани в зоне контакта с имплантатами, их миграции не отмечено. У пациентов группы А ни в одном случае не отмечено переломов винтов и их миграции, но в 23,5% развилась нестабильность в соседнем сегменте. При сравнении показателей групп между собой $p < 0,05$.

Выводы. Динамическая фиксация обеспечивает надежную стабильность фиксируемого сегмента и в отличие от ригидных, динамические фиксаторы обеспечивают профилактику биомеханических перегрузок в смежных сегментах, что предотвращает развитие синдрома смежного уровня. При использовании динамической стабилизации в меньшем проценте случаев возникает рецидивов болевых и неврологических синдромов, а также не развивается нестабильность в смежных сегментах, что обеспечивает оптимальные условия для послеоперационной адаптации пациентов к обычному образу жизни.

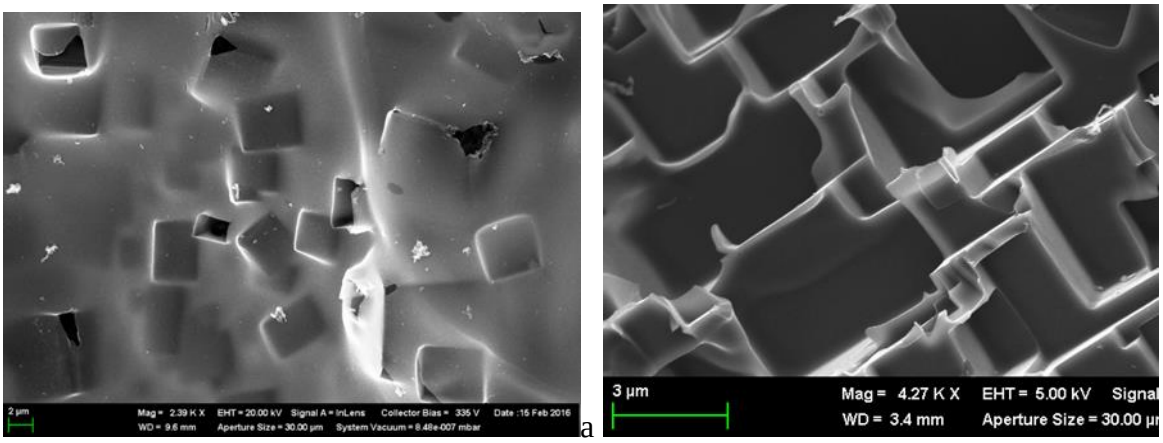
ИЕРАРХИЧЕСКИ СТРУКТУРИРОВАННЫЙ ГРАФЕН-НАНОАЛМАЗНЫЙ КОМПОЗИТ

Елшина Л.А.[1,2], Мурадымов Р.В.[1], Елшина В.А. [1,2], Вовкотруб Э.Г. [1], Шатунова А.А. [1,2], Пряхина В.И. [2], Пелегов Д.В. [2], Шур В.Я. [2]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук, д. 20, ул. Академическая, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация, e-mail: yolshina@ihte.uran.ru*

[2] *Уральский федеральный университет им. Б.Н.Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация*

Иерархически упорядоченные пленки наноалмаз-графен с линейными размерами до 200 мкм были синтезированы посредством химического взаимодействия твердых органических прекурсоров с расплавленными галогенидами щелочных металлов на воздухе при температурах ниже 1073 K. Основной особенностью углеродных пленок является анизотропия: одна сторона пленки очень гладкая с единичными квадратными углублениями (Рис.1а), а другая сторона – очень развитая с хорошо выраженными квадратными ступенями с характеристическими углами 90° (Рис.1б). Углеродная пленка была охарактеризована методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, Оже-спектроскопии, Рамановской спектроскопии, электронной микроскопии во вторичных электронах и просвечивающей микроскопии, рентгенофазового анализа и электронной дифракции на отдельных участках.



а б

Рис.1. Изображение во вторичных электронах (а) гладкой стороны и (б) развитой стороны иерархически структурированной углеродной пленки

Для точного определения sp^2 и sp^3 гибридизации углерода в пленке использован анализ рентгеновского возбужденного C KLL Оже-пика, позволяющего полу- количественно различить эти два состояния. Дифференциальная форма спектра позволяет измерять D-параметр, являющийся индикатором относительного содержания sp^2 и sp^3 углерода. D-параметр графита 21 eV, алмаза - 13 eV, а образуемой нами графено-алмазной пленки - 18 eV, следовательно примерно 32% углерода в пленке находится в sp^3-гибридизации, который был идентифицирован при помощи ПЭМ как наноалмазы диаметром 2-5 нм.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-33-00652 мол-а.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской федерации (постановление 211, контракт 02.A03.21.0006).

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ и «Состав вещества» ИВТЭ УрО РАН.

СИНТЕЗ НОВЫХ ЦИНК-ГРАФЕНОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Елшина Л.А.[1,2], Елшина В.А.[1,2], Шатунова А.А.[1,2]

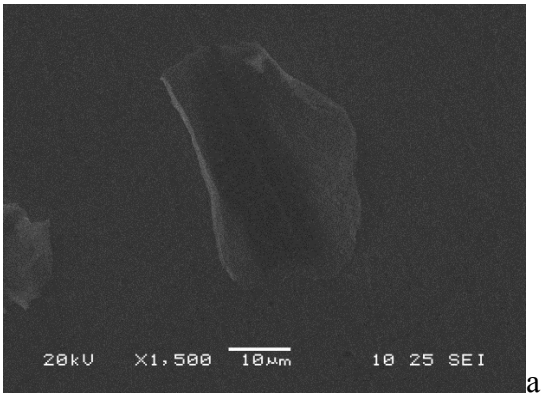
[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук, д. 20, ул. Академическая, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация, e-mail: yolshina@ihte.uran.ru*

[2] *Уральский федеральный университет им. Б.Н.Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация*

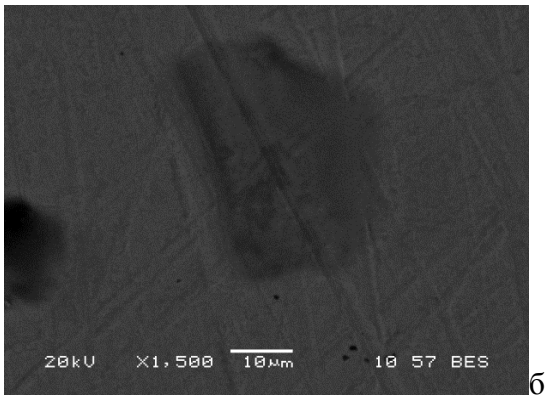
Графен обладает уникальными физическими и механическими свойствами, такими как самая высокая измеренная прочность, высокая жесткость, при том, что графен является самым растяжимым кристаллом, что делает его очень привлекательным материалом для создания металлических графеновых композитов.

Вероятно, упрочняющее воздействие графена на металломатричный композит связано как с выдающимися механическими свойствами графена, так и с большой границей связи между графеном и металлом матрицы. Хорошее распределение графена внутри металла традиционными металлургическими методами очень затруднено в связи с огромной разницы в плотностях металлов и графеновых пленок, большей площадью межфазного контакта по сравнению с углеродными нанотрубками и возможными побочными реакциями с металлом, т.к. металлы очень реакционноспособны. Исходя из разницы атомной массы металлов и графена очевидно, что добавление графена в металлы уменьшает их плотность, что является решающим для свинца в применении к свинцовому кислотному аккумулятору, существенно улучшая его удельные характеристики [1].

Цинк-графеновые металлические композиты были получены прямым химическим взаимодействием расплавленного цинка с органическими и неорганическими углеродсодержащими прекурсорами под слоем расплавленных галогенидов щелочных металловна воздухе аналогично свинцовым отличаются равномерным распределением по объему металла чешуек графена или дорированные азотом графена размером до 100 мкм, что приводит к высокой однородности свойств композитов., а также уменьшением плотности и увеличением тепло- и электропроводности цинк-графенового композита. Цинк-графеновый металлический композитный материал может стать основой цинк-воздушных батарей нового поколения, характеризующихся высокими удельными характеристиками.



а



б

Рис. 1. SEM (а) и BES (б) изображение шлиф цинк-графенового композита

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-33-00652 мол-а. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Состав вещества» ИВТЭ УрО РАН.

Литература

1. L.A. Yolshina, V.A. Yolshina, A.N. Yolshin, S.V. Plaksin. Novel lead-graphene and lead-graphite metallic composite materials for possible applications as positive electrode grid in lead-acid battery. Journal of Power Sources 278 (2015) 87-97.

A MAGNETIC METHOD FOR DETECTING PLASTIC STRAIN LOCALIZATION ZONES

Gorkunov E.S.[1], Zadvorkin S.M.[1], Kuzevanov V.F.[1], Dimitrov R.[2]

[1]*Institute of Engineering Science, UB RAS, Ekaterinburg, Russia*
[2]*"Kontrol" Ltd, Haskovo, Bulgaria*

The paper describes a magnetic method for detecting plastic strain localization zones by recording magnetic leakage fields induced by the deformation of a test piece in its surface layers, on the areas with slip bands.

The magnetic method has been developed for detecting strain localization zones in products made of ferromagnetic materials at early stages of the formation and evolution of these zones, before microcracking. The method enables one to enhance the capabilities of studying plastic deformation, namely:

- to represent strain localization zones in the form of graphs and topograms without a preliminary preparation of product surfaces, including those with protective coatings up to 150 μm thick;
- to ensure high sensitivity to changes in material structure parameters in strain localization zones at the initial stage of plastic deformation;
- to detect and represent the state of a strained material not only on the surface, but also in deep layers;
- to simplify the technical implementation of detecting and representing plastic strain localization zones.

The required result is achieved due to the application of non-contact magnetic testing with the use of transducers for recording magnetic fields. The method enables the process of testing to be mechanized and automated, it is applicable to detecting and locating both single and multiple zones of plastic strain localization, it is easy to implement and can be used in various industries, particularly metallurgy, mechanical engineering and transportation.

The study was financed by the Russian Foundation for Basic Research project No. 16-08-08-01077 and budget theme (state registration No. 01201354598). The researchers used the equipment of the "Plastometriya" collective use center.

MAGNETIC TECHNIQUE FOR DETECTING DISCONTINUITIES IN PRODUCTS MADE OF NON-FERROMAGNETIC MATERIALS

Gorkunov E.S.[1], Zadvorkin S.M.[1], Kuzevanov V.F.[1], Dimitrov R.[2]

[1]*Institute of Engineering Science UB RAS, Ekaterinburg, Russia*
[2] *"Kontrol" Ltd, Haskovo, Bulgaria*

A magnetic technique is proposed to detect discontinuities in metal products. It stems from the dependence of magnetic field strength on the surface of conducting objects on the density of the electric current flowing in them and the magnetic field strength gradients appearing on the areas with discontinuities due to a change in the current density. The paper studies magnetic field distribution on the surface of aluminum alloy specimens with model discontinuities as electric current flows in them. During testing, electric current is passed through the product and magnetic field strength on various surface areas is recorded by scanning the product surface with a magnetically sensitive transducer. The scan results, namely, the presence of field strength extrema, testify to the presence of discontinuities in products made of non-ferromagnetic metals. The technique has been tested on an aluminum-alloy specimen containing a weld with a discontinuity.

The study was financed by UB RAS project No. 15-10-1-22 and budget theme (state registration No. 01201354598). The researchers used the equipment of the "Plastometriya" collective use center.

МАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛИ 15ХН4Д В УСЛОВИЯХ УПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Горкунов Э.С., Якушенко Е.И., Задворкин С.М., Мушников А.Н.

ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: mushnikov@imach.uran.ru

При воздействии на намагниченный ферромагнетик упругих или пластических деформаций происходит смещение доменных границ или вращение векторов намагниченности. В результате ферромагнетик изменяет свое магнитное состояние. На практике даже условно размагниченный ферромагнетик подвергается воздействую магнитного поля Земли, направление которого зависит от географического расположения исследуемого объекта.

В работе представлены экспериментальные результаты исследования влияния упругих деформаций по схемам одноосного растяжения/сжатия, кручения, внутреннего давления и их комбинаций на нормальную и тангенциальную составляющие магнитных полей рассеяния образцов, находящихся в размагниченном или остаточно намагниченном состоянии, а так же во внешнем магнитном поле, прикладываемом в разных направлениях. Для компенсации воздействия магнитного поля Земли создана оснастка испытательного стенда из трех пар взаимно перпендикулярных квадратных катушек Фанселау.

Показано, что деформирование размагниченных образцов, находящихся в нулевом магнитном поле, не приводит к необратимому изменению их магнитного состояния. При деформировании в слабых магнитных полях вдоль оси образца (0,25…0,75 А/см) наблюдается рост намагниченности, которая сохраняется после снятия нагрузки. Упругое нагружение остаточно намагниченных полем 20 А/см образцов, напротив, вызывает снижение уровня остаточной намагниченности.

При намагничивании перпендикулярно оси образца и регистрации индукции в этом же направлении внешнее магнитное поле вызывает значительное увеличение показаний магнитометра. Однако необратимого намагничивание образца практически не происходит – после уменьшения тока в катушках до исходного (компенсирующего Земное поле) значения нормальная составляющая вектора магнитной индукции соответствует значению размагниченного образца.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 16-38-00598 мол_а). При выполнении исследований использовалось оборудование ЦКП «Пластометрия».

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА РАЗЛИЧНЫХ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АУСТЕНИТНОЙ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Путилова Е.А.[1], Горкунов Э.С. [1], Задворкин С.М. [1], Мушникова С.Ю. [2]

[1] *ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация*

[2] *ФГУП "ЦНИИ КМ "ПРОМЕТЕЙ", Санкт-Петербург, Российская Федерация*

e-mail: tuevaevgenya@mail.ru

Ключевые слова: высокоазотистая коррозионностойкая сталь, сварное соединение, структура, стабильность магнитных характеристик, нормальные и касательные напряжения.

Широкое использование коррозионностойких сталей в различных областях современной промышленности и для реализации различных целей и задач стало закономерной причиной всестороннего исследования как уже хорошо известных марок коррозионностойких сталей, так и тех, чья область применения пока ограничена. К последним можно отнести созданные в конце прошлого столетия коррозионностойкие стали аустенитного класса с повышенным содержанием азота.

Задачей данного исследования являлось, во-первых, изучение структуры механических свойств основного металла, металла шва и околошовной зоны (ОШЗ) сварного соединения стали 04Х20Н6Г11М2АФБ. Во-вторых, проводились эксперименты по изучению поведения магнитных параметров металла различных зон сварного соединения при упругопластическом деформировании по различным схемам с целью определения магнитной стабильности материала и возможности применения неразрушающих методов контроля и диагностики для выявления отклонений характеристик материала от регламентируемых значений в процессе эксплуатации объекта из исследуемой стали.

Изучены закономерности изменения магнитных параметров исследуемых материалов при реализации различных схем нагружения: растяжение, кручение, внутреннее давление, комбинация растяжения с кручения. Установлено, что металл сварного шва и околошовной зоны, сварного соединения, как и основной металл, демонстрирует стабильность фазового состава и магнитных свойств при различных условиях нагружения. Сделан вывод о возможности использования стали 04Х20Н6Г11М2АФБ для изготовления сварных деталей и элементов сварных конструкций, требующих низкой намагниченности и высокой стабильности магнитных характеристик при силовом воздействии.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы УрО РАН «Арктика» (проект №15-15-1-52). При выполнении работы использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Путилова Е.А., Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С., Чернядьева Е.А.

ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: tuevaevgenya@mail.ru

Ключевые слова: высокоазотистая коррозионностойкая сталь, сварное соединение, структура, стабильность магнитных характеристик, нормальные и касательные напряжения.

Развитие современной промышленности тесно взаимосвязано с созданием и внедрением новых технологий и в особенности перспективных материалов, которые удовлетворили бы постоянно повышающиеся требования к их прочностным и технологическим свойствам, а также долговечности, надежности и экономичности. Анализ тенденций развития современного производства свидетельствует о том, что одно из эффективных решений отмеченной проблемы заключается в разработке и создании многокомпонентных или многослойных материалов. Слои или компоненты таких материалов по-отдельности обладают разным набором требуемых свойств, но при их соединении возможно получение материала, который будет сочетать в себе преимущества каждого из слоев.

Для обеспечения высокой коррозионно-эрозионной стойкости корпусов судов ледового плавания и особенно мощных атомных ледоколов целесообразно использовать при их строительстве стали, устойчивые к воздействию морской воды и ледовых полей. Так как коррозионный износ затрагивает только наружную поверхность обшивки корпуса, то экономически целесообразно повысить коррозионную стойкость не по всей толщине корпуса, а обеспечить ее в тонком плакированном поверхностном слое (до 5 мм), изготовленном из коррозионностойкой стали. В месте контакта двух сталей могут происходить структурные изменения, вызывающие появление значительных внутренних напряжений, способствующих образованию микротрещин и снижающих прочность соединения. Одним из важных требований, предъявляемых к подобным материалам, является стабильность структуры, фазового состава и, во многих случаях, магнитных характеристик коррозионностойких сталей при силовом воздействии. В связи с этим возникает необходимость диагностики изменений, происходящих в изделиях из подобных материалов в процессе изготовления и эксплуатации, и актуальной является задача разработки методик неразрушающего контроля для оценки текущего состояния деталей машин и элементов конструкций из коррозионностойких аустенитных сталей.

Задачей данного исследования являлось изучение фазового состава, механических и магнитных свойств двухслойных соединений корпусной высокопрочной стали и коррозионно-стойких сталей с разной степенью стабильности аустенита с целью определения возможности использования магнитных методов для диагностики текущего состояния подобных материалов. Установлена возможность диагностики образования магнитно-упорядоченной фазы в этих сталях по максимальной намагниченности в максимальном приложенном поле (намагниченности насыщения) и максимальной магнитной проницаемости, монотонно изменяющихся с ростом степени деформации. Значения максимумов на полевых зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости могут служить параметрами для диагностики образования новой магнитно-упорядоченной фазы и ее количества, образующейся в процессе пластической и упругопластической деформации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-38-60027. При выполнении работы использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

АНОМАЛЬНЫЙ РОСТ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ РАЗНЫХ ВИДАХ ПЕРЕГРУЗОК: СРАВНЕНИЕ ФРАКТОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сундер Р., Биаков А., Еремин А., Панин С.

BiSS (P) Ltd, 497E 14th Cross, 4th Phase, Peenya Industrial Area
Bangalore 560058, India, e-mail: rs@biss.in
Институт физики прочности материалов и материаловедения СО РАН и Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

Известно, что периодическое приложение перегрузки растяжения может тормозить процесс роста трещины. Известно также, что приложение перегрузки сжатия (недозагрузки) вслед за перегрузкой растяжения снимает в значительной степени такую задержку. Любопытно также что, если ее приложить перед перегрузкой растяжения, ее эффект не ощутим на задержку в росте трещины. Такие эффекты взаимного влияния нагрузок очень актуальны для расчета на остаточную долговечность элементов авиаконструкций. Их относят к таким явлениям, как закрытие трещины и остаточным напряжениям у кончика трещины.

Настоящая работа посвящена изучению аналитических моделей, основанных на явлении закрытия трещины а также на тесной связи порогового коэффициента интенсивности напряжения с остаточными напряжениями впереди кончика трещины. На основании этих моделей построены кинетические параметры, контролирующие скорость роста трещины включая при этом, возможность полного торможения ее роста. Моделирование производилось для разных случаев последовательностей перегрузок и недозагрузок.

Для сверки результатов моделирования проводились испытания на компактных образцах из дюралюминия. Полученные при этом усталостные изломы подверглись фрактографическому анализу. Установленные при этом фактические характеристики роста трещины между периодическими перегрузками подтверждают результаты моделирования. Это служит обоснованием годности продвижения моделей для расчета остаточной долговечности элементов конструкций при эксплуатационных нагрузках.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ Ti-Nb СЛОЕВ

Поляков И.А., Самойленко В.В., Чучкова Л.В.

Новосибирский государственный технический университет, д. 20, пр. К.Маркса, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация, e-mail: status9@mail.ru

Современное развитие промышленности выдвигает повышенные требования к материалам, работающим в условиях агрессивных сред. Реализуются подобные условия на заводах и предприятиях по переработке отработанного ядерного топлива, а также при перекачке и хранении сильных кислот. Одним из перспективных материалов, обладающим высоким комплексом механических свойств и повышенным уровнем коррозионной стойкости является титан. Титан стоек в большинстве агрессивных сред и промышленных растворов. Однако его стойкость резко снижается при использовании в кипящих кислотах. Увеличение коррозионной стойкости титана достигается за счет легирования его таким элементом как ниобий.

Традиционная технология получения Ti-Nb сплавов заключается в многократном электродуговом переплаве в вакууме или защитной среде, что является трудоемким процессом. С другой стороны, для обеспечения высокой коррозионной стойкости достаточно защитить от агрессивного воздействия только поверхность материала. Поскольку ниобий является тугоплавким элементом, то при создании поверхностно легированных слоев целесообразно использовать высокоэнергетические методы. Анализ различных методов высокоэнергетической обработки свидетельствует о высокой эффективности технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки. Однако оптимизация режимов электронно-лучевой наплавки слоев Ti-Nb ранее не проводилась. В связи с этим целью работы является получение высококачественных слоев, содержащих ниобий, на поверхности титановых заготовок методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки.

Реализуется данная технология на укорителе электронов ЭЛВ-6 в ИЯФ СО РАН. Наплавка слоев, содержащих ниобий, осуществлялась на пластины из титана ВТ1-0 размером 100x50x12 мм. Легирующая порошковая смесь состояла из 50 % (вес.) Nb, титана 10 % (вес.) Ti, 30 % (вес.) CaF_2 и 10 % (вес.) LiF. Общая масса насыпки составила 22,5 г. Перед обработкой порошковая смесь наносилась на поверхность титановой заготовки. Затем заготовка устанавливалась на подвижный стол, по которому перемещалась со скоростью 10 мм/с. Расстояние от поверхности образца до выпускного отверстия составляло 90 мм. С целью определения оптимального режима обработка проводилась на токе 22-26 мА.

Структура поверхностно легированных материалов, наплавленных на различных токах, имеет преимущественно схожее строение. Поперечное сечении композита «титан– слой Ti-Nb» представлено тремя зонами: зоной наплавленного металла, зоной термического влияния и зоной основного металла. Установлено, что с увеличением тока пучка увеличивается толщина слоя, содержащего ниобий. Так для образцов, полученных на токе 22 и 23 мА, толщина поверхностного слоя составляет 1,6 и 1,8 мм соответственно. Слой сформированный при токе 24 мА имеет толщину 2 мм. Наибольшей толщиной 2,5 и 3 мм обладают Ti-Nb слои, наплавленные на токе 25 и 26 мА соответственно.

Микроструктура Ti-Nb слоя, сформированного на токе 22мА имеет дефектное строение. В наплавленном слое присутствуют нерасплавившиеся частицы ниобия и поры. Увеличение тока до 23 мА приводит к формирования бездефектного слоя. При этом структура титан-ниобиевого сплава имеет однофазное строение с ярко выраженной дендритной ликвацией по всему сечению наплавленного слоя. Дальнейшее увеличение тока до 26 мА не приводит к значительным структурным изменением. Следует отметить, что с увеличением тока пучка концентрация Nb в слое снижается. Это объясняется увеличением объема титана, который переходит из основы в наплавляемый слой.

Таким образом можно сделать вывод что наиболее оптимальный режим электронно-лучевой наплавки обеспечивающий формирование бездефектного Ti-Nb слоя с высоким содержанием ниобия реализуется на токе 23 мА.

ЗАО «ЛАБЦЕНТР» – АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Пучков А.В.

ЗАО «Лабцентр», 55, Куйбышева, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация,
e-mail: info@labcenter.ru

ЗАО «Лабцентр» предлагает комплекс услуг по оснащению испытательных и исследовательских лабораторий, включая поставку, пуско-наладку, гарантийное и постгарантийное обслуживание оборудования, постановку методик, консультационное сопровождение.

ЗАО «Лабцентр» представляет следующее оборудование:

- анализаторы остаточных напряжений производства «Rigaku» Япония. В основе работы анализаторов используется принцип дифракции рентгеновских лучей. Модельный ряд представлен стационарными анализаторами AutoMATE II, MSF-3V/PSF-3M и портативной моделью SmartSite RS. Анализ напряжений возможно проводить в различных материалах — металлах, сплавах, керамиках, в том числе крупнокристаллических и текстурированных, деталях сложной формы и большого размера.

- сканер механических напряжений STRESSVISION производства «Феррологика» Россия. Сканер предназначен для измерения, 3D-визуализации и оценки механических (остаточных, технологических) напряжений объектов контроля из сталей ферритного класса. Работа прибора основана на принципе измерения параметров магнитной анизотропии в зоне контроля. Выходной сигнал датчика прибора пропорционален разности главных механических напряжений, действующей в зоне установки преобразователя на поверхность объекта контроля в заданном направлении. Измерения проводятся путем ручного сканирования объекта контроля.

- Оборудование для проведения физико-механических испытаний производства TiniusOlsen (Великобритания/США). Модельный ряд TiniusOlsen представлен электромеханическими машинами серии ST с нагрузкой от 1 до 600 кН, гидравлическими машинами серии SL с нагрузкой от 150 до 3000 кН, роботизированными комплексами серии МНТ с нагрузкой от 5 до 300 кН, маятниковыми копрами с инструментированным бойком, экстензометрами (автоматический, видеоэкстензометр).

- Испытательные машины на длительную прочность и ползучесть производства Applied Test Systems (США).

- Испытательные системы производства SincoTec (Германия) для проведения испытаний на усталость.

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ ИЗБЫТОЧНОЙ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ

Худорожкова Ю.В., Буров С.В.

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

Целью настоящей работы является исследование структуры подсистемы избыточного цементита заэвтектоидной углеродистой стали У13А и определение коэрцитивной силы для полученных структур.

Из литературных данных и собственных данных авторов известно, что в сталях могут быть реализованы различные морфологии избыточного цементита: глобулярная, в виде сетки, в виде цементитных игл (пластин) видманштеттовой природы [1]. Характер распределения глобулярного цементита также может различаться – быть равномерным или носить неравномерный характер, глобули избыточного цементита могут залегать слоями или строчками по границам бывшего аустенитного зерна.

Для реализации различных морфологий и характера распределения избыточного цементита были подготовлены 4 группы образцов, с применением термической обработки и обработки давлением.

Группа 1: Нормализация с температуры нагрева 1160 °С, прокатка с обжатием в 3 раза в интервале 800…700 °С. Итоговая обработка нормализация с 780 °С. В структуре получено преимущественно слоистое залегание глобулей избыточного цементита.

Группа 2: Нормализация с температуры нагрева 900 °С, вторая нормализация с температуры 850 °С, отжиг при 650 °С, 1 час. Итоговая обработка нормализация с 780 °С. В структуре равномерно распределенные избыточные карбиды.

Группа 3: Нормализация с температуры нагрева 1100 °С. Итоговая обработка нормализация с 780 °С. В структуре игольчатые избыточные карбиды.

Группа 4: Отжиг при температуре 950 °С, 1 ч. Итоговая обработка нормализация с 780 °С. В структуре сетка избыточных карбидов по границам бывших аустенитных зерен.

Несмотря на то, что итоговой термической обработкой всех групп образцов являлась нормализация с температуры нагрева 780 °С, для получения одинаковой структуры перлитной основы стали, на перлитное превращение накладывает отпечаток морфология избыточного цементита. Для всех четырех групп структура перлитной основы представляет собой смесь глобулярного и пластинчатого перлита, однако с номером группы доля пластинчатого перлита возрастает. Несмотря на увеличение доли пластинчатого перлита обладающего большей коэрцитивной силой Нс, коэрцитивная сила составляет для первой группы образцов 10,8 А/см, для второй группы 13,6 А/см, для третьей группы 14,0 А/см, для четвертой группы 11,3 А/см. Такая разница в значениях коэрцитивной силы может быть вызвана различиями в морфологии и характере распределения избыточного цементита.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием (№ ГР 01201354598). При выполнении исследований использовалось оборудование ЦКП «Пластометрия».

Литература

1. Burov S. V., Khudorozhkova Yu. V. Distributional and Morphological Changes in Excess Cementite During Deformation of Hypereutectoid Steels [Electronic resource] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 6. – P. 80–89. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.6.80-89. URL: http://dream-journal.org/issues/2015-6/2015-6_71.html

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ РЕФЛЕКТОРОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Москвичев В.В., Доронин С.В.

СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН, д. 53, пр. Мира, г. Красноярск, 660049, Российская Федерация,
e-mail: krasn@ict.nsc.ru

Особенностью крупногабаритных рефлекторов антенн наземного и космического применения Q/Ka-частотного диапазона являются высокие требования к геометрической стабильности, прочности, ресурсу, надежности в широком диапазоне силовых и температурных воздействий. Эти требования в совокупности с ограничениями по массо-инерционным характеристикам приводят к целесообразности использования современных полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе с памятью формы.

Прогнозирование и обеспечение технических требований к рефлекторам предполагает использование как классических, так и разработку новых постановок задач расчетно-экспериментального исследования механики деформирования и предельных состояний силовых конструкций рефлекторов из ПКМ. Эти задачи относятся к следующим укрупненным группам: разработка и практическая реализация технологии экспресс-анализа концептуальных конструктивных решений рефлекторов наземных и космических антенн из полимерных композиционных материалов; исследование напряженно-деформированных и предельных состояний рефлекторов для оптимизации их конструктивных решений; прогнозная оценка характеристик рефлекторов наземных и космических антенн и подтверждение их соответствия техническим требованиям; научно-методическое и организационно-техническое обеспечение испытаний рефлекторов и технологических процессов их производства.

Рассматривается структура предметной области знаний, обеспечивающих постановку и решение указанных задач в их системной взаимосвязи. Исходя из структуры предметной области и технических требований к конструкциям рефлекторов, сформулирована целесообразность многоуровневого иерархического подхода к содержанию решаемых задач и используемых моделей. На первом этапе исследования представляется рациональным рассматривать следующие четыре иерархических уровня:

– уровень базовый – рассматриваются геометрически упрощенные конфигурации рефлекторов, представленные преимущественно параболоидами с соответствующими геометрическими параметрами. На этом уровне оцениваются т.н. «базовые» характеристики конструкций, используемые в дальнейшем как отправная точка для анализа;

– уровень экспресс-анализа – выполняется расчетная оценка принципиальной возможности построения и работоспособности упрощенных конструктивных вариантов, соответствующих ряду альтернативных концепций рефлекторов;

– уровень инженерного проектирования – осуществляется полный расчетный анализ и оценка эффективности конструктивных решений с инженерной степенью детализации, соответствующей действующим отраслевым нормативным документам;

– уровень исследования механики конструкций – разрабатываются теоретические положения и реализуются практические подходы к исследованию вопросов, общих для конструкций рефлекторов из ПКМ как представителей класса технических объектов.

Взаимосвязь нормируемых технических характеристик, варьируемых геометрических и конструктивных параметров рефлекторов, свойств ПКМ отражается информационными моделями причинно-следственных отношений, включаемых в обоснование постановки задач и определяющих унифицированные алгоритмы их решения.

Благодарности. *Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Министерства образования и науки России). Договор № 02.G25.31.0147*

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОВРЕЖДЕННОСТЬ ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ГИДРОЭКСТРУЗИИ

Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Вичужанин Д.И., Горулева Л.С.

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

Объектом исследования служила прутковая горячекатаная сталь У8А со структурой зернистого перлита, подвергнутая пластической деформации методом гидроэкструзии за четыре прохода при комнатной температуре. Суммарные вытяжки по проходам составили 2,19; 3,24; 5,06; 9. Методами рентгеноструктурного анализа (РСА) определяли остаточные напряжения в феррите при различных степенях деформации. РСА показал, что для поверхностных слоев образцов характерны сжимающие остаточные напряжения. При этом расчет с помощью метода конечных элементов величины окружных остаточных напряжений дает противоположный знак этих напряжений на поверхности образцов. Это противоречие можно объяснить тем, что помощью метода конечных элементов рассчитывали остаточные напряжения непосредственно на поверхности, в то время как РСА позволяет определять усредненные значения напряжений в поверхностном слое толщиной 15…20 мкм.

Методом гидростатического взвешивания определяли плотность исследованного образца, которая, как известно[1], является физической характеристикой поврежденности материала. Показано, что с ростом степени деформации плотность материала монотонно уменьшается, что свидетельствует об увеличении его поврежденности.

По результатам экспериментальных исследований пластичности и моделирования методом конечных элементов построена диаграмма предельной пластичности. Диаграмма использована для оценки поврежденности стали в процессе многопереходной гидроэкструзии прутка.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-01077 и бюджетной темы (№ гос. регистрации 01201354598).

Литература

1. Smirnov S., Domilovskaya T. Definition of the kinetic equation form for damage under the plastic deformation. // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 26, pp. 373–379.

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В СТАЛЯХ СО СТАБИЛЬНЫМ И МЕТАСТАБИЛЬНЫМ АУСТЕНИТОМ ПРИ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Худорожкова Ю.В., Каманцев И.С., Буров С.В.

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

Цель настоящей работы разработка комплексного метода выявления структурных изменений в зоне предразрушения и образования усталостных трещин в условиях многоциклового усталостного нагружения. Материалами исследования являлись сталь Х12Ф1, закаленная от 1100 °С и сталь 08Х18Н10Т. Испытания на многоцикловую усталость проводили по схеме трехточечного изгиба образцов с надрезом типа Шарпи. Циклическое нагружение образцов осуществлялось на высокочастотной испытательной машине MIKROTRON (RUMUL).

Для контроля процесса зарождения усталостной трещины и оценки параметров циклической трещиностойкости исследованных материалов применен метод динамической спекл-интерферометрии, что позволило, без остановки циклических нагружений, определить возникающие в зоне зарождения и роста трещины изменения микрорельефа, обусловленные TRIP эффектом.

Для образцов в исходном состоянии и после зарождения в них трещин определяли магнитные характеристики. На полированной поверхности образцов исследовали структурные изменения возникающие в результате деформации и мартенситного превращения методами оптической микроскопии, растровой электронной микроскопии, методом EBSD. Изменение микрорельефа поверхности оценивались с помощью оптического профилометра.

Образцы зондировали спекловым пучком, направленным под углом 30° к поверхности. Выявлено, что спекл-интерферометрия позволяет в лабораторных условиях надежно спрогнозировать место зарождения усталостной трещины.

Методами структурного анализа показано, что перед зарождением и в процессе роста трещины имеет место локализация деформации, характеризующаяся мартенситным превращением. Магнитные характеристики показали, что как для хромоникелевой стали со стабильным, так и для хромистой стали с метастабильным аустенитом процесс зарождения и роста трещины сопровождается образованием магнитной α-фазы. Образование α-мартенсита также подтверждено результатами EBSD анализа.

Применение методов неразрушающего контроля в сочетании с фиксацией длины усталостной трещины и регистрацией резонансной частоты нагружения позволило достоверно оценить стадии процесса накопления усталостной поврежденности, момент появления усталостной трещины и кинетику ее роста.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием (№ ГР 01201354598), при частичной поддержке гранта РФФИ (проект №16-08-01077_а) и проекта УрО РАН (проект № 15-10-1-22). При выполнении исследований использовалось оборудование ЦКП «Пластометрия».

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Гоголева О.В., Петрова П.Н., Попов С.Н.

ФГБУН ИПНГ СО РАН, Россия, Якутск, ул. Автодорожная, д.20

Введение. Климат регионов Арктики, в том числе Республики Саха (Якутия), характеризуется продолжительным периодом с экстремально низкими температурами, а также большой амплитудой температурных перепадов, что отрицательно отражается на эффективность эксплуатации и надежность техники, в которых используются полимерные детали. Среди полимеров, применяющихся для изготовления деталей узлов трения в криогенной технике, большой интерес представляет сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), который относится к новому поколению полимеров, изделия из которого используются там, где обычные марки полимеров не выдерживают жестких условий эксплуатации. СВМПЭ обладает исключительно высокой ударной прочностью, износостойкостью, стойкостью в агрессивных средах, гидрофобностью и влагостойкостью, а также способностью сохранять перечисленные свойства при низких температурах (до -269 0С).

Результаты исследований и их обсуждение. В качестве наполнителей СВМПЭ были использованы базальтовые волокна, терморасширенный графит и вермикулит.

Таблица 1 – Физико-механические и триботехнические характеристики модифицированного СВМПЭ

Состав	ε_p, %	δ_p, МПа	Е, МПа	I, мг/ч	*f* тр
СВМПЭ (ТНКХ)	270	30	800	2,33	0,37
СВМПЭ+5-20 мас. % БВ	240-280	35-43	1085-1195	0,43-0,87	0,38-0,40
СВМПЭ+5-20мас. % БВ (акт.)	210-280	38-45	715-765	0,30-0,67	0,38-0,40
СВМПЭ+1-6 мас% ТРГ	210-250	28-36	800-860	0,08-0,20	0,31-0,38
СВМПЭ (GUR-4120)	340-350	37-38	760	0,49	0,36
СВМПЭ+1-5% БВ (с\акт)	300-330	39-41	1000-1100	0,10-0,12	0,25-0,38
СВМПЭ+0,5-1 мас.% верм. (акт)	340-360	34-36	700-850	0,13-0,15	0,36-0,38
СВМПЭ+0,5-1 мас.% верм. (с\акт)	380-410	36-38	650-700	0,13-0,26	0,23-0,29

Установлено, что при модифицировании СВМПЭ базальтовыми волокнами, вермикулитом и терморасширенным графитом достигается улучшение физико-механических и триботехнических показателей композитов по сравнению со свойствами исходной матрицы. Так, при модифицировании ТРГ СВМПЭ в количестве от 1 до 6 мас.% приводит к повышению износостойкости до 28 раз, абразивного изнашивания на порядок при некотором снижении или сохранении механических свойств композитов по сравнению с показателями исходной матрицы. Такое существенное повышение износостойкости, вероятно, связано с формированием устойчивой фрикционной пленки переноса в процессе трения.

Показана эффективность использования приемов механической активации наполнителей и совместной активации компонентов композита с целью получения материалов с повышенной износостойкостью и улучшенными физико-механическими показателями.

Заключение. По итогам исследований выявлена перспективность использования базальтового волокна, вермикулита и терморасширенного графита в качестве модификаторов СВМПЭ для получения полимерных материалов с повышенными механическими характеристиками. На разработанный состав на основе СВМПЭ и ТРГ имеется патент РФ.

Таким образом, разработанные полимерные композиты с повышенными техническими характеристиками рекомендуется использовать в механизмах, с предполагаемым высоким степенем истирания, а также в агрессивных средах, что имеет важное значение при эксплуатации технологического оборудования горнодобывающей промышленности, нефтегазового комплекса и др.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ В ДИАГНОСТИКЕ РАКА ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Лях В.Д. [1], Гагиев В.В. [1], Смирнов А.С. [2]

[1] *5 военный клинический госпиталь внутренних войск МВД России, д.10, ул. Соболева, г. Екатеринбург, 620036, Российская Федерация*

[2] *Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

По статистике заболеваемость раком щитовидной железы (РЩЖ) ежегодно возрастает. Так в США за 2014 год выявлено 63000 случаев РЩЖ, в России - 13,5 случаев на 100000 населения, при этом сохраняется стойкая тенденция к росту. Актуальность проблемы и возрастающее распространение рака щитовидной железы стимулируют поиски новых методов диагностики.

На сегодняшний день в арсенале медиков имеется ряд диагностических методов: ультразвуковое исследование (УЗИ), компьютерная томография, магниторезонансная томография (МРТ), сцинтиграфия и тонкоигольная аспирационная биопсия (ТАБ). Все выше перечисленные методы в совокупности позволяют достоверно установить диагноз РЩЖ, но в то же время имеют ограниченные возможности на начальной стадии диагностики. Следует отметить, что применение ТАБ несет с собой потенциальные риски, связанные с повреждением сосудисто-нервных структур (синдром Бернара - Горнера, образование гематомы).

Инфракрасная термография (ИКТ) регистрирует температурное излучение поверхности кожи человека, не воздействуя излучением на пациента, что является безопасным для здоровья пациента и медицинского персонала. ИКТ позволяет на основе данных об излучении от поверхности тела пациента определить в локальных местах характер проблематики, связанной с воспалением, застойностью или злокачественностью внутренних структур организма [1]. Согласно работам [1-3] достоверность применения ИКТ при первичной диагностики некоторых заболеваниях составляет 100%, а в целом составляет порядка 80% для первичных обследований. Таким образом, разработка методов диагностики заболеваний с использованием ИКТ и повышение её достоверности является актуальной задачей.

Целью данной работы является исследовать возможность применения ИКТ в диагностике РЩЖ и определения дальнейшей тактики лечения.

При обследовании пациентов применяли комплексный подход для диагностики РЩЖ, который заключается в комплексном применении УЗИ, сцинтиграфии, ТАБ и ИКТ. Для обследования пациентов методом ИКТ использовали инфракрасную камеру NEC TH-9100WL. Спектральный диапазон камеры 8-14 мкм. Размер изображения 320x240 точек, минимально различаемая разность температур 0,05 °С при 30 °С.

Из обследованных, на данный момент, 17 пациентов - у двоих пациентов, прошедших комплексное обследование и хирургическое лечение, гистологически подтвержден РЩЖ. Инфракрасная термография показала наличие локальных областей с повышенной температурой. Еще двое нуждаются в оперативном лечении с гистологической идентификацией.

Литература

1. Шушарин А., Морозов В., Половинка М. Медицинское тепловидение-современные возможности метода // Современные проблемы науки и образования. – 2011. № 4.

2. Виноградов В.И., Веретенов И.С., Слезко В.Н. и др. Некоторые аспекты применения термографии при реабилитации пациентов с нарушением функций опорно-двигательной и нервной систем // Функциональная диагностика. – 2005. – № 3. – С. 72–78.

3. Заяц Г.А., Коваль В.Т. Медицинское тепловидение – современный метод функциональной диагностики // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2010. – Т. 43. № 3. – С. 27–33.

ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РЕМОНТНИХ РАБОТАХ И В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

Бутаков С.В.[1], Полянский С.Н.[2], Каржавин В.В.[3], Сенив В.М.[4]

[1]*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация, e-mail: bsv_53@mail.ru*

[2] *ООО «Инновационные технологии», г. Екатеринбург, Российская Федерация*

[3] *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620078, Российская Федерация, т. 375-46-94, e-mail: politic@rambler.ru*

[4] *ГНО ООО «Когалым НПО-Сервис», Тюменская область, г. Когалым, Российская Федерация, т.44-801, e-mail: Seniv.vladimir@impos.ru*

Особое внимание к состоянию поверхности объясняется не столько требованиями к внешнему виду изделий, сколько параметрами, определяющими служебные и эксплуатационные характеристики деталей (коррозионная стойкость, износостойкость, усталостные свойства, и т.д.). При производстве доля затрат на операции обработки поверхности составляет не менее 10% затрат от общей стоимости изготовления деталей массового производства, в ряде производств эти затраты достигают 40%. В ремонтном производстве очистка поверхности от различных загрязнений представляет непростую задачу, особенно если поверхность деталей имеет сложную форму. В этом случае затраты на очистку значительно возрастают. Распространенные технологии химического и механического удаления окалины, технологических покрытий имеют ряд недостатков. Существенные недостатки имеют место при удалении с поверхности сложных композиций пластичных и хрупких составляющих технологических покрытий и загрязнений. Применяемые химические и механические методы приводят к дополнительной нагрузке на природоохранные мероприятия. Однако, они не гарантируют получения качественной без дефектов (механических и химических) поверхности металла, а также негативных и аномальных воздействий на окружающую среду.

В последние годы распространение получает технология гидроабразивной обработки (ГАО). Процесс обработки состоит в направленном воздействии рабочей струи, состоящей из потока сжатого воздуха и распыленной в ней суспензии. В состав суспензии входит вода, абразивные частицы определенного зернового состава, химические реагенты. Отмечают высокую производительность и особо - показатели качества поверхности, полученные при обработке. Технологию ГАО принципиально отличает от других технологий струйно-абразивной обработки (пескоструйной, дробеструйной) механизм взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. На поверхность воздействуют не только высокоскоростной поток воздуха и абразивных частиц, но и ударное действие жидкости. Применение химических реагентов усиливает действие абразивных частиц и жидкости, и существенно расширяют возможности технологии [1–3].

Проведены исследования по оценке эффективности технологии ГАО. Показано, что данная технология позволяет обрабатывать поверхность изделий с шероховатостью менее Ra 0,5 мкм с незначительным увеличением неровностей, в результате получается чистая матовая поверхность. Метод обеспечивает вскрытие микродефектов. Имеется возможность обработки сложных труднодоступных поверхностей. В результате обработки получают максимально возможную степень чистоты поверхности Sa 3,0 ISO 8501.

Литература

1. Polyanskii S.N., Butakov S.V., Olkov I.S. CHEMICAL AND PETROLEUM ENGINEERING. Volume 49, Issue 11-12, March 2014, pp. 820-824.

2. Polyanskii S.N., Butakov S.V., Olkov I.S Metallurgist 2014, Volume 58, Issue , May 2014 Pages 11-15

3. Полянский С.Н., Бутаков С.В., Александров В.А., Ольков И.С. // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 109. – № 1, с. 138–142.

CLEANING TOOL SURFACES DURING REPAIRMENT AND PRODUCTION PROCESS

Butakov S.V.[1], Polyanskii S.N.[2], Karzhavin V.V.[3], Seniv V.M.[4]

[1]*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620012, Ekaterinburg, Ilyich Sreet, 47, apt. 116, tel.89193847052, e-mail: bsv_ 53@mail.ru*

[2] *"Innovative technologies" Ltd., Ekaterinburg*

[3]*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620078, Ekaterinburg, Komsomolskaya Street, 78, apt. 120, tel. 375-46-94,E-mail: politic@rambler.ru*

[4]*"Kogalym NPO-Service" Ltd., Tyumen region, Kogalym, tel. 44-801, e-mail: Seniv.vladimir/@impos.ru*

The special attention paid to the surface state is explained not so much by the product appearance requirements, but by the parameters defining the service and performance characteristics of tools (corrosion resistance, wear resistance, fatigue properties, etc.) In the production process the share of costs for surface treatment operations comprises at least 10% of the total product price; in many industries these expenses might reach up to 40%. During the repairment process, the surface cleaning from various contaminants is a difficult task, especially if the tool surface has a complex shape. In this case, the cleaning costs rise significantly. Common technologies used for chemical and mechanical removal of the scale and technological coatings have several disadvantages. Significant deficiencies occur when complex ductile and brittle components of technological coatings and contaminants are removed from the surface. Most chemical and mechanical cleaning methods lead to additional burden for environmental protection. However, they do not guarantee obtaining high-quality and defect-free (mechanically/ chemically) metal surfaces,as well as negative and anomalous effects on the environment.

Recently, the technology of hydroabrasive treatment (liquid-abrasive processing LAP) has become widespread. This process is a directional influence of the working jet consisting of the compressed air stream in which special suspension is sprayed. The slurry includes water, abrasive particles of a certain grain composition, and chemical reagents. As can be noted, such treatment helps to achieve higher performance and, in particular, excellent surface qualities. LAP technology fundamentally differs from other technologies of jet abrasive processing (sand blasting, shot blasting) by its mechanism of interaction with the surface. The surface is affected not only by a high-speed air stream with abrasive particles, but also by a shock action of the liquid. The use of chemical reagents increases the effect of abrasive particles and liquids, and significantly expands the capabilities of the described technology [1-3].

The research aiming at assessing the effectiveness of LAP technology has been conducted. It is found out that this technology allows to process the product surfaces with a roughness less than Ra 0.5 μm with a slight increase of asperity. As a result, a clean matte surface is achieved. The method enables to detect microdefects, handle difficult-to-reach surfaces and obtain the maximum possible degree of surface cleanliness Sa 3,0 ISO 8501.

References

1. Polyanskii S.N., Butakov S.V., Olkov I.S. CHEMICAL AND PETROLEUM ENGINEERING. Volume 49, Issue 11-12, March 2014, pp. 820-824.
2. Polyanskii S.N., Butakov S.V., I. Olkov I.S. Metallurgist 2014, Volume 58, Iss., May 2014, Pages 11–15.
3. Polyansky, S.N., Butakov S.V., Aleksandrov V.A., Olkov I.S. Works of GOSNITI. – 2012. – T. 109, no. 1. – P. 138–142.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОНА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Калашников В.И., Москвин Р.Н., Белякова Е.А.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», д. 28, ул. Германа Титова, г. Пенза, 440028, Российская Федерация, e-mail: var_lena@mail.ru

Основным требованием, предъявляемым к станинам для станков, является длительное обеспечение правильного взаимного положения узлов и частей, смонтированных на ней, при всех предусмотренных режимах работы станка в нормальных эксплуатационных условиях. Базирующими поверхностями станины являются ее направляющие, на которые устанавливаются детали и узлы станка. Эти детали и узлы могут перемещаться по направляющим станины, либо быть жестко с ней связаны. Это достигается изготовлением станин определенной жесткости, способности к деформации и амортизации и полным отсутствием риска трещинообразования в материале.

Основными материалами для изготовления станин, которые удовлетворяют данным требованиям, служили чугуны и стали, а также полимербетоны. Эти материалы обладают высокими эксплуатационными характеристиками и технологичностью при изготовлении из них изделий. Однако их изготовление требует специального литейного металлургического и металлообрабатывающего оборудования. Поэтому поиск альтернативных материалов для изготовления станин станков является актуальным.

До недавнего времени в связи с низкими прочностными характеристиками цементные бетоны не рассматривались как материал для производства станин для станков. Однако в последние десятилетия, как за рубежом, так и в России были созданы бетоны так называемого нового поколения – High Performance Concrete, или сокращенно HPC.

На кафедре «Технологии строительных материалов и деревообработки» ПГУАС были разработаны составы неармированных (не содержащие фибру) самоуплотняющихся бетонов, демонстрирующих высокие прочностные характеристики: прочность при сжатии 100-200 МПа, при изгибе – 15-25 МПа в зависимости от состава. В случае использования фибры и дополнительных технологических процедур прочность на сжатие достигнет 250 МПа, а на изгиб 35-40 МПа. Высокая прочность при изгибе свидетельствует, что данный бетон устойчив к трещинообразованию и может использоваться в сферах, где трещиностойкость является одним из наиважнейших критериев. Таким образом, по таким характеристикам как прочность, модуль упругости, поведении при нагревании сверхвысокотехнологичные бетоны нового поколения сопоставимы с природными каменными породами, например, гранитом. Элементы из такого бетона обладают хорошей внутренней амортизирующей способностью, что позволяет гасить колебания на 50-80% быстрее, чем традиционные конструкции из чугуна и стали. Также бетонные элементы, в сравнении с чугунными и стальными, обладают неоспоримым преимуществом – термической инертностью, т.е. очень медленной реакцией на изменение температуры. Таким образом, станина из бетона придает станку улучшенную динамику, выраженную в увеличении скорости подачи обрабатываемого материала при сохранении заданной точности изготовления.

Такие уникальные для бетона свойства достигаются оптимально подобранным гранулометрическим составом исходных компонентов, разделенным на три масштабных уровня. Первый микрометрический уровень включает в себя цемент, каменную муку из плотных и прочных горных пород (гранит, кварцит, базальт и др.), микрокремнезем и др. Средний уровень представлен фракционированным кварцевым песком или песком из плотных и прочных горных пород. Особенностью такого песка является оптимально подобранные соотношения между фракциями 0,1-0,5 мм, 0,5-2 мм и 2-5 мм. Применение щебня (макроуровень) в бетонах нового поколения, в отличие от традиционного бетона, является необязательным, однако его использование позволяет не только сократить расход микро- и нанометрических компонентов, но, что важнее, уменьшить усадку бетона. Однако такие высокие прочностные свойства были бы недостижимы без использования пластификаторов на карбоксилатной основе. Именно их применение сделало возможным превратить бетоны в самоуплотняющиеся с минимальным расходом воды и, как следствие, низкой усадкой и высокими физико-механическими свойствами готового бетона.

USING OF COCNRETE OF NEW GENERATION IN MECHANICAL ENGINEERING

Kalashnikov V., Moskvin R., Belyakova E.

Penza State University of Architecture and Construction
28, German Titov St., Penza, 440028, Russia

The main requirement to the frame for machines is the correct long-term providing of the relative position of components and parts mounted on it, for all modes provided by the machine in normal operating conditions. Main surfaces of the frame are its rails, which are installed on the machine parts and components. These parts and components can be moved along the rails or be rigidly connected with frame. This can be achieved by manufacturing machine beds a certain rigidity, deformability and amortization, and the complete absence of a risk of cracking in the material.

The main materials for the manufacture of machine beds that satisfy specified requirements, were iron and steel, and polymer concrete. These materials have the high performance and work abilities in the manufacture of the products. However, their production requires special metallurgical foundry and metalworking equipment. Therefore, the searching for alternative materials for the manufacture of the machine beds is important.

Until recently, due to low strength characteristics cement concretes was not considered as a material for the production of machine beds for machines. However, in recent decades, both abroad and in Russia was established so-called concrete of new generation - High Performance Concrete, or HPC.

The department "Technology of building materials and wood" Penza State University of Architecture and Construction developed compositions of unreinforced (containing fiber) self-compacting concrete, demonstrating high strength properties: compressive strength of 100-200 MPa, flexural - 15-25 MPa depending on the composition. In the case of using fibers and additional technological procedures a compressive strength reaches of 250 MPa and 35-40 MPa in bending. High flexural strength shows that the concrete is resistant to cracking and can be used in areas where the fracture is one of the most important criteria. Thus, characteristics such as strength, modulus of elasticity, behavior when heated show us a ability to compare HPC concretes of new generation to natural rocks, such as granite. Elements of such concrete have good internal damping ability that allows quenching oscillations 50-80% faster than the traditional constructions of the cast iron and steel. Also concrete elements, compared with iron and steel, have a huge advantage - thermal inertia, i.e. very slow reaction to temperature changes. Thus, the frame of such concrete gives the machine improved dynamics expressed in increasing the feed rate of the processed material while maintaining a predetermined accuracy of manufacture.

These unique properties for concrete are achieved with optimally matched particle size distribution of the starting components, divided into three large-scale levels. First micrometer level includes cement, stone flour dense and solid rock (such as granite, quartzite, basalt et al.), microsilicae etc. Secondary level presented with fractionated quartz sand or sand from a dense and solid rock. The peculiarity of this sand is optimally selected ratio between the fractions 0,1-0,5 mm, 0,5-2,0 mm and 2,0-5,0 mm. Applying gravel (macro level) in concrete of the new generation, unlike conventional concrete, is optional, but its use can not only reduce the consumption of the micro and nanometric components, but, more importantly, reduce shrinkage. However, such high strength properties would be unattainable without using carboxylate-based plasticizers. That made it possible to use them to turn into self-sealing concrete with minimum consumption of water and, as a consequence, low shrinkage and high physical and mechanical properties of the finished concrete.

УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ БИОБАЗИРОВАННОГО ПОЛИАМИДА 1010, НАПОЛНЕННЫХ РУБЛЕНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Никифоров А.А. [1], Охотина Н.А. [1], Вольфсон С.И.[1], Ринберг Р. [2], Кролл Л.[2]

[1] *Казанский национальный исследовательский технологический университет, 68, ул. Карла Маркса, г. Казань, 420015, Российская Федерация*

e-mail: antonnikifor@gmail.com

[2]*Хемницкий технический университет, 62, штрассе де Национе, г. Хемниц, 09111, Германия*

В последнее время в связи с постоянно растущими экологическими проблемами большое внимания уделяется замене ископаемого сырья на возобновляемые источники сырья, в первую очередь растительного происхождения. Полимерные материалы, получаемые на основе растительного сырья, называются биобазированными и представляют самостоятельный интерес как основной материал, и как матрица для биокомпозитов.

Для получения биокомпозитов большой интерес, в первую очередь, представляют целлюлозные волокна, но они не всегда обеспечивают необходимый комплекс физико-механических свойств. Известно, что в ряде случаев удается изменить свойства полимерных композитов при использовании комбинации наполнителей различного типа. В литературе отсутствует информация о композитах такого типа на основе полиамида 1010. В настоящей работе исследованы свойства композитов из биобазированного полиамида 1010, наполненных короткими стекло- и углеволокнами, а также сочетанием целлюлозных и углеволокон, которые были получены в условиях, приближённых к промышленным, на двухшнековом экструдере с гравиметрической дозировкой волокон.

Проведенные исследования показали, что композиции на основе биобазированного полиамида 1010, наполненного рублеными стеклянными углеродными, и целлюлозными волокнами, показывают конкурентоспособные физико-механические характеристики. Композиции, наполненные стекловолокном, имеют более низкий уровень модуля упругости при растяжении и изгибе по сравнению с композициями, содержащими углеволокно, но превышают их по показателям предела текучести, особенно при высоких степенях наполнения. Для композиций с углеволокном характерен достаточно высокий уровень прочностных свойств и более высокая устойчивость к тепловой деформации. Композиции с комбинацией целлюлозных и углеволокон имеют промежуточные свойства и привлекательны с точки зрения снижения веса и стоимости конструкций.

Поскольку уже при первичной обработке полиамида происходит разрушение волокон, оценена степень измельчения стекловолокна при изготовлении композиций на основе полиамида 1010 в двухшнековом экструдере. Фракционный состав волокна был определен методом выжигания полимерной матрицы.

Показано, что при средней начальной длине рубленых стеклянных волокон 4500 мкм при приготовлении композиций происходит практически десятикратное уменьшение их длины при всех дозировках стекловолокна. Во всех образцах преобладает фракция с размерами 250-500 мкм (42-48 %). Увеличение степени наполнения повышает содержание более мелкой фракции 100-250 мкм с 23 до 40-48 % и снижает содержание более крупных фракций

Исследование свойств композиций показало, что с увеличением степени наполнения растёт вязкость композиции, увеличиваются напряжения сдвига, и происходит более интенсивное измельчение. При содержании стекловолокна в композите 20–40 % мас. практически отсутствуют волокна длиной свыше 1 мм. Уменьшение размеров волокон наполнителя и уменьшение разброса по длине волокна снижает вероятность появления в композитах трещин, «псевдопор», возникающих в процессе нагружения при отслоении матрицы от частиц наполнителя в зоне критических напряжений. Этим, вероятно, можно объяснить некоторое возрастание ударной вязкости композиций по Шарпи для образцов без надреза и с надрезом, хотя при увеличении содержания жесткого наполнителя должно происходить существенное снижение ударной вязкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности 10.863.2014/К.

STRESS-STRAIN PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON BIO-BASED POLYAMIDE 1010 REINFORCED WITH CUT FIBERS

Nikiforov A.A.[1], Okhotina N.A.[1], Volfson S.I.[1],Rinberg R.[2], Kroll L.[2]

[1] *Kazan National Research Technological University, Karl Marx street 68, Kazan, 420015, Russia, e-mail: antonnikifor@gmail.com*

[2] *Chemnitz Univetsity of Technology, Chemnitz 09111, Germany, Strasse de Natione 62*

In recent time due to ever growing ecological problems, much attention is given to replace fossil fuels with renewable raw materials, especially plant raw materials. Polymers which produced from plant raw materials, called bio-based materials. They are interesting as matrix for biocomposites, and as self-consistent materials as well.

The main interest for producing biocomposites is reinforcing with cellulose fibers, but their reinforcing ability could be not sufficient for improving physical and mechanical properties to the highest level. It is known that in some cases it is possible to improve properties by combining different types of reinforces. In scientific literature there are no information about composites based on polyamide 1010 with combined carbon and cellulose fibers. In current research properties of cut glass, carbon and combined carbon and cellulose fibers reinforced composites based on polyamide 1010 were obtained on twin screw extruder with gravimetric dosing system, which is close to industrial conditions.

Provided research had shown that composites based on polyamide 1010 reinforced by glass, carbon, cellulose have competitive physical and mechanical properties. Composites reinforced with glass fibers had shown lower tensile modulus in comparison with carbon reinforced composites but have higher tensile strength, especially at higher fiber content. Carbon fiber reinforced composites have high level of mechanical properties and higher heat deflection temperature. Composite with combined carbon and cellulose fibers have medium properties and attractive due to decreasing of material costs and construction weight.

Because during primary processing fiber breakage occur, the particle size distribution of fibers in polyamide 1010 composites after extrusion in twin screw extruder was estimated.

Was shown that average fiber length was declined from 4500 μm down to 10 times at all composites. Increasing of fiber content in composite increase fraction with 100-250 μm from 23% to 40-48% and decrease amount of higher length fraction.

Research of composite properties shows that with increasing fiber content in composite, viscosity increases also, which leads to more intensive fiber breakage. In composites with glass fiber content 20-40% almost no fibers with length higher than 1 мм. Decreasing fiber size and decreasing spread in length values decreasing variety of crack formation during loading process while matrix segregated from filler particles in critical loading zone. This possible explanation of increasing Charpy impact strength notched and unnotched samples, instead of decreasing of impact strength.

This work was carried out under Governmental project № 10.863.2014/K with the help of Ministry of Education and Science.

КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА И МОДИФИЦИРОВАННОГО ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

Файзуллин И.З., Вольфсон С.И., Мусин И.Н., Филиппов А.С., Файзуллин А.З.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, д. 68, ул. Карла Маркса, г. Казань, 420015, Российская Федерация, e-mail: ilnur-fz@mail.ru

Согласно литературным данным, для полимерных материалов предполагается пропорциональность предела текучести и модуля упругости. Однако на практике для полимерных композитов очень часто предел текучести снижается по мере роста модуля упругости. Этот факт представляет значительный практический интерес, поскольку предел текучести ограничивает сверху область эксплуатации пластичных конструкционных полимерных материалов.

Одним из наиболее перспективных и многообещающих направлений развития современной науки является разработка и исследование полимерных композитов с нанонаполнителем. Наиболее часто в качестве нанонаполнителя используют наноглины и нанотрубки. Отличительной особенностью наночастиц является отношения площади поверхности к объему частиц, намного большее, чем у объемных материалов обычных размеров. Уменьшение размера частиц и высокоразвитая поверхность изолированных наночастиц очень сильно увеличивает их реакционную способность, химическую активность, что оказывает существенное влияние на физико-механические и эксплуатационные свойства композиций в случае интеркалирования и эксфолирования наночастиц в полимерной матрице.

Нанонаполнители играют важную роль в формировании комплекса свойств полимерных композитов (ДПК), что необходимо учитывать при выборе рецептуры ДПК и параметров его переработки.

Целью настоящей работы является изучение зависимости модуля упругости и предела текучести для древесно-полимерных композитов на основе полипропилена в зависимости от размера частиц и дозировки древесной муки, типа и способа ввода нанонаполнителей. Так же представлялось важным изучение влияния нанонаполнителей на структуру ДПК.

Изучена зависимость модуля упругости и предела текучести для древесно-полимерных композитов на основе полипропилена в зависимости от типа и дозировки древесной муки, типа и способа нанонаполнителей.

В качестве полимерного связующего ДПК был выбран промышленный термопласт полипропилен марки 1525J производства ОАО «Нижнекамскнефтехим», индекс текучести расплава которого равен 2,9 г/10мин (ТУ 2211-136-05766801-2006).

В работе в качестве дисперсного наполнителя использовалась древесная мука марок ДМ Л60, ДМ 180, ДМ 400, ДМ 560. Размер частиц древесной муки составлял 60, 170, 410 и 500 мкм соответственно.

Дозировка древесной муки составляла 30, 40, 50 % мас. Перед смешением исходные ингредиенты подвергались сушке в термошкафу в течение 2 часов.

В качестве модификатора ДПК в работе использовались нанодобавки: наноглина монтмориллонит марки Cloisite 15A фирмы Rockwood (США), а также одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) марки TUBAL производства фирмы OCSiAl (Россия).

Дозировка ОУНТ составляла 0,08 % мас., а наноглины 1,35 % мас.

Структура поверхности сколов может объяснять конструкционные качества изделий: устойчивость к нагрузкам на изгиб, упругие качества и механическую прочность.

Исследование макроструктуры композитного материала проводилось с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Jenaval.

Структура поверхностей сколов исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на мезо-, и микроуровнях на микроскопе РЭМ-100У.

Результаты работы показали, что с уменьшением размера частиц древесной муки в композициях больше увеличивается интервал изменения параметра модуля упругости. При этом изменение предела текучести происходит в узком интервале и составляет 6 %.

Модификация ДПК нанодобавками позволяет существенно повысить модуль упругости композитов, при этом предел текучести практически не изменяется.

Комплекс сканирующей электронной и оптической микроскопии может служить для контроля качества изделий, их микропараметров и сопровождать подбор рецептуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности 10.863.2014/К.

COMPOSITION BASED ON POLYPROPYLENE AND MODIFIED WOOD FILLER

Fayzullin I.Z., Volfson S.I., Musin I.N., Filippov A.S., Fayzullin A.Z.

Kazan National Research Technological University, 68, Karl Marx, Kazan, 420015, Russia, e-mail: ilnur-fz@mail.ru

According to the literature data, polymeric materials assume the proportionality of yield strength and elastic modulus. However, in practice, increasing elastic modulus often decreases yield strength of polymer composites. This fact is of considerable practical interest because the yield strength limits the operation area of plastic structural polymeric materials.

One of the most ambitious and promising directions of modern science is the development and study of polymer composites with nano-fillers. The common nano-fillers are nanoclay and nanotubes. A distinctive feature of the nanoparticles is the ratio of surface area to particles' volume. It is larger than the conventional size of bulk materials. Reduction of particle size and highly-developed surface of isolated nanoparticles enhances their reactivity, chemical activity, which has a significant impact on the physical - mechanical and service properties of the compositions when nanoparticles are intercalated and exfoliated in the polymer matrix.

Nanofillers play an important role in formation of the wood-plastic composites' (WPC) property package. It should be considered when choosing WPC recipe and its processing parameters.

The aim of this work is to study the elastic modulus and yield strength for wood-plastic composites on the basis of polypropylene depending on the particle size and wood flour dosage, nanofillers type and input method. Also it is important to study the effect of nanofillers on the WPC structure.

There was investigated the dependence of the elastic modulus and yield strength for wood-plastic composites based on polypropylene on the type and dosage of the wood flour, nanofillers type and input method.

As polymeric binder for WPC there has been selected industrial thermoplast - polypropylene 1525J manufactured by PJSC "Nizhnekamskneftekhim", with melt flow index equal to 2.9 g / 10min (TU 2211-136-05766801-2006).

In work process there were used the following wood flour marks – L60 WF, WF 180, WF 400, WF 560 - as a dispersed filler. The size of wood flour particles was 60, 170, 410 and 500 microns.

Wood flour weight dosage was about 30, 40, 50 %. Before being mixed the raw ingredients had been dried in a heat chamber for 2 hours.

As WPC modifier there were used the following nano-additives: the nano clay montmorillonite Cloisite 15A by Rockwood company (USA), as well as single-wall carbon nanotubes (SWCNT) TUBAL by OCSiAl company (Russia).

The SWCNT dosage was 0.08 wt. % and 1.35 wt. % of nanoclay.

The structure of the cleavage surface may explain the structural quality of the products: resistance to bending load, elastic qualities and mechanical strength.

The composite material macrostructure research was conducted with the help of an optical microscope Carl Zeiss Jenaval.

The cleavage surface structure was studied by the use of scanning electron microscopy (SEM) on the meso- and micro levels by the SEM-100U microscope.

The results of the work showed that with the decreasing size of the wood flour particles in the compositions the variation range of the elastic modulus parameter is further increased. The change of yield strength occurs in a narrow range, and is about 6 %.

WPC modified with nano-additives allows to increases the elastic modulus of composites, wherein the yield strength remains practically the same.

The complex of scanning electron and optical microscopy can be used to control the quality of the products, their micro parameters and may accompany recipe selection.

This work was carried under Governmental project № 10.863.2014/K with the help of Ministry of Education and Science.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СИЛУМИНА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Аксёнова К.В.[1*], Громов В.Е.[1], Коновалов С.В.[1], Иванов Ю.Ф.[2,3]

[1]*Сибирский государственный индустриальный университет, д. 42, ул. Кирова, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация, e-mail:* alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru

[2]*Институт сильноточной электроники СО РАН, д. 2/3, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

[3]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация, e-mail:* yufi55@mail.ru

В настоящей работе исследовано изменение при усталостном нагружении свойств поверхности силумина, подвергнутого предварительной электронно-пучковой обработке с целью повышения усталостного ресурса.

Усталостным испытаниям подвергали силумин марки АК12 по схеме циклического несимметричного консольного изгиба. Облучение поверхности образцов, приготовленных к усталостным испытаниям, осуществляли на установке «СОЛО» при следующих параметрах: энергия электронов U = 18 кэВ; частота следования импульсов f = 0,3 $с^{-1}$; длительность импульса пучка электронов τ = 150 мкс; плотность энергии пучка электронов E_S = 20 Дж/$см^2$, количество импульсов воздействия N_1 = 1 и N_2 = 5. Прочностные свойства материала изучали, определяя микротвердость (микротвердомер HVS-1000A, нагрузка на индентор 100 мН) и нанотвердость (нанотвердомер NANO Hardness Tester NHT-S-AX-000X, нагрузка на индентор 5-300 мН). Исследования скорости износа системы пленка/подложка проводилось с помощью трибометра (CSEM, Швейцария) при комнатной температуре и влажности. Объем износа материала определялся после проведения профилометрии образовавшегося трека с помощью лазерного оптического профилометра MicroMeasure 3D Station (Stil, Франция).

Из результатов исследований трибологических параметров силумина после ЭПО и усталостного нагружения следует, что оптимальной обработкой поверхности силумина с точки зрения трибологических испытаний является облучение интенсивным импульсным электронным пучком с параметрами 20 Дж/$см^2$; 150 мкс; 1 имп., при котором интенсивность изнашивания материала снижается в 2,1 раза, а коэффициент трения – в 1,15 раза. После многоцикловых (517000 циклов) усталостных испытаний интенсивность изнашивания и величина коэффициента трения силумина, подвергнутого ЭПО с параметрами 20 Дж/$см^2$; 150 мкс; 5 имп., возрастают, однако также остаются ниже относительно показателей, зафиксированных для исходного материала (необлученного материала перед усталостными испытаниями).

ЭПО приводит к формированию в образцах силумина упрочненного поверхностного слоя толщиной ~30 мкм, в котором величина микротвердости в зависимости от режима ЭПО в 2…5 раз превышает микротвердость основы (0,5 ГПа). Максимального значения величина микротвердости достигает в образцах, подвергнутых ЭПО с параметрами 25 Дж/$см^2$; 150 мкс; 3 имп., и составляет 2,25 ГПа.

ЭПО с параметрами 20 Дж/$см^2$; 150 мкс; 1 имп. приводит к многократному (в 5,6 раза) увеличению нанотвердости поверхностного слоя при малых нагрузках на индентор. Увеличение числа циклов усталостного нагружения в ≈4,4 раза приводит к снижению нанотвердости поверхностного слоя в ≈4,5 раза. Подобным же образом изменяется и величина модуля Юнга силумина: увеличение числа циклов усталостных испытаний приводит к многократному (в 3…4 раза) снижению модуля Юнга поверхностного слоя материала.

Очевидно, что наблюдаемые изменения трибологических и прочностных характеристик силумина вызваны изменением структурно-фазовых состояний поверхностного слоя в процессе усталостных испытаний. Сформированная при ЭПО структура ячеистой кристаллизации существенно модифицируется при многоцикловых усталостных испытаниях. Особенно это касается кремниевых прослоек, которые при числе циклов нагружения 132000 разбиваются на частицы наноразмерного диапазона (15…30) нм. После 574000 циклов нагружения наблюдается не только наноструктуризация прослоек кремния, но и полное разрушение структуры ячеистой кристаллизации. Это сопровождается глобуляризацией частиц кремния,

равномерно располагающихся в объеме зерен, и формированием сетчатой дислокационной субструктуры со скалярной плотностью дислокаций $3{,}4*10^{10}$ см$^{-2}$.

Таким образом, проведены исследования трибологических и прочностных свойств поверхности силумина, подвергнутого многоцикловым усталостным испытаниям и выявлено снижение твердости, увеличение скорости изнашивания и коэффициента трения с ростом числа циклов усталостного нагружения. На основании анализа результатов исследования структурно-фазовых состояний поверхности после ЭПО и усталостного нагружения можно сделать вывод, что возможной причиной изменения трибологических и прочностных является разрушение структуры ячеистой кристаллизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (проект МД-2920.2015.8) и государственного задания № 3.1496.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТЬ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛОВ: РАЗЛОЖЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ, МЕРА ДЕФОРМАЦИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ

Трусов П.В.[1], Швейкин А.И.[2]

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, пр. Комсомольский, г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: [1]tpv@matmod.pstu.ac.ru,[2]alexsh59@bk.ru

Значительная часть технологических процессов переработки металлов и сплавов реализуется интенсивным неупругим деформированием. Совершенствование существующих и разработка новых технологий переработки требует создания соответствующих математических моделей, «сердцевиной» которых являются определяющие соотношения (ОС). Одной из сложностей построения геометрически нелинейных ОС является не решенная до настоящего времени проблема разложения движения, или – выделения из движения представительного объема произвольно деформируемого твердого тела части, ответственной за квазитвердое движение. В большинстве работ, посвященных формулировке геометрически нелинейных определяющих соотношений, решение указанной проблемы подменяется задачей построения ОС, удовлетворяющих требованию независимости от выбора системы отсчета [1]. Следует отметить, что последняя может быть решена множеством (мощности континуум) способов [2]. В известных геометрически нелинейных ОС упруговязкопластичности, как правило, за основу принят упругий закон в скоростной релаксационной форме (вида $\mathbf{\Sigma}^{r}= \mathbf{\Pi}:(\mathbf{M}-\mathbf{M}^{p})$, где $\mathbf{\Sigma}$ – мера напряжений, r означает ту или иную независящую от выбора системы отсчета производную (чаще всего – коротационную), $\mathbf{\Pi}$ – тензор 4-го ранга упругих характеристик, $\mathbf{M}$ – мера скорости деформации, $\mathbf{M}^{p}$ – ее пластическая составляющая). Основное отличие существующих геометрически нелинейных ОС заключается в выборе мер (деформаций и напряжений) и коротационной (реже – конвективной) производной.

При формулировке ОС в терминах актуальной конфигурации в качестве $\mathbf{\Sigma}$ обычно используется тензор напряжений Коши, $\mathbf{M}$ – тензор деформации скорости $\mathbf{D}$; при этом тензор $\mathbf{\Pi}$ при переходе от упругого закона в терминах напряжений и деформаций к его скоростной форме принимается постоянным. Рассмотрены примеры формулировок скоростной формы упругого закона, наиболее распространенные в нелинейной упругопластичности, в том числе – использующих коротационную производную с «логарифмическим спином» [3, 4].

Гипотеза о постоянстве тензора $\mathbf{\Pi}$, конечно, выполняется для изотропных материалов, однако в общем случае анизотропного материала она не справедлива. Авторами показано, что для эквивалентности скоростной и конечной форм упругого закона необходимо наличие жесткой подвижной системы координат (ПСК), в которой компоненты тензора $\mathbf{\Pi}$ остаются постоянными, при этом меры скоростей деформации и напряжений определяются как коротационные производные мер деформаций и напряжений (используемых в упругом законе в конечной форме), устанавливаемые с позиций наблюдателя во введенной ПСК. В качестве ПСК для монокристаллических материалов авторами предложено использовать систему координат, связанную с кристаллографическим направлением и кристаллографической плоскостью. С использованием указанной ПСК ведено разложение движения, определен «решеточный» спин и соответствующие коротационные производные, установлен физический смысл неголономной меры деформации. Показано, что для введенных ОС выполняются требования независимости от выбора системы отсчета и отсутствия диссипации на любых замкнутых циклах упругой деформации. При рассмотрении поликристаллических материалов спин представительного объема определяется осреднением спинов ПСК кристаллитов, образующих представительный объем. Приведены примеры применения предлагаемых ОС, включенных в двухуровневую упруговязкопластическую модель, к анализу деформирования моно- и поликристаллических образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, № гос. регистр. 01201460535), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 14-01-00069-а, 15-08-06866-а).

Литература

1. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. – М. : Мир, 1975. – 592 с.

2. Поздеев А. А., Трусов П. В., Няшин Ю. И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. – М. : Наука, 1986. – 232 с.

3. Xiao H., Bruhns O. T., Meyers A. Logarithmic strain, logarithmic spin and logarithmic rate // Acta Mechanica. – 1997. – Vol. 124. – P. 89–105.

4. Xiao H., Bruhns O. T., Meyers A. Objective corotational rates and unified work-conjugacy relation between Eulerian and Lagrangean strain and stress measures // Arch. Mech. – 1998. – Vol. 50, no. 6. – P. 1015–1045.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АНОМАЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В СЛОИСТО- БЛОКОВОЙ СРЕДЕ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Хачай О.А.[1], Хачай А.Ю.[2]

[1] *Институт геофизики Уральского отделения Российской Академии Наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: olgakhachay@yandex.ru*

[2] *Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: 1c@ta-ural.ru*

Геологическая среда является открытой системой, на которую действуют внешние и внутренние факторы. Они приводят ее к неустойчивому состоянию, которое, как правило, проявляется локально в виде зон, называемых динамически активными элементами, которые являются индикаторами потенциальных катастрофических источников. Эти объекты отличаются от вмещающей геологической среды своими структурными формами, которые часто являются формами иерархического типа. Процесс их активизации может наблюдаться с помощью мониторинга волновых полей, для математического обеспечения которого разработаны новые алгоритмы моделирования с использованием метода интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. Разработан новый подход к интерпретации волновых полей, для определения контуров или поверхностей локально напряженных иерархических объектов**.** В работе [1] предложена концепция поэтапной интерпретации переменного электромагнитного поля. На первом этапе определяются параметры нормального разреза, или параметры вмещающей одномерной немагнитной среды аномальные проводящие, либо магнитные включения. На втором этапе осуществляется подбор аномального переменного электромагнитного поля системой сингулярных источников, помещенных в горизонтально-слоистую среду с определенными на первом этапе геоэлектрическими параметрами. На третьем этапе решается теоретическая обратная задача, т.е. при заданных геоэлектрических параметрах вмещающей среды для набора параметров неоднородностей определяются контуры этой неоднородности. Получены явные интегро-дифференциальные уравнения теоретической обратной задачи рассеяния двумерного и трехмерного переменного и трехмерного стационарного электромагнитных полей в рамках моделей: проводящее, либо магнитное тело в ν-ом слое проводящего n-слойного полупространства [2,3].

В работе рассмотрена проблема построения алгоритма решения обратной задачи с использованием уравнения теоретической обратной задачи для 2-D уравнения Гельмгольца. Получено явное уравнение теоретической обратной задачи для случаев рассеяния линейно поляризованной упругой волны в слоистой упругой среде с иерархическим упругим включением, плотность которого для всех рангов равна плотности вмещающего слоя. Построен итерационный алгоритм определения контуров несоосных включений *k*-го ранга в иерархической структуре с последовательным использованием решения прямой задачи вычисления упругого поля *k*-1 ранга. С увеличением степени иерархичности структуры среды увеличивается степень пространственной нелинейности распределения составляющих сейсмического поля, что предполагает исключение методов линеаризации задачи при создании методов интерпретации. Эта проблема неразрывно связана с решением обратной задачи для распространения сейсмического поля в таких сложных средах с использованием явных уравнений теоретической обратной задачи [4]. Впервые выписано уравнение для определения поверхности аномально напряженного включения в иерархической слоисто-блоковой среде по данным акустического мониторинга. На практике с использованием этого алгоритма мы можем по данным акустического мониторинга локализовать область возможного очага горного удара, либо готовящегося землетрясения и оценить степень аномальных упругих напряжений.

Литература

1. Хачай О. А. Математическое моделирование и интерпретация переменного электромагнитного поля в неоднородной коре и верхней мантии Земли : дис. … докторская. – Свердловск : ИГФ УрО РАН, 1994. – 314 с.

2. Хачай О. А. Об интерпретации двумерных переменных и трехмерных стационарных аномалий электромагнитного поля // Изв. АН СССР, Физика Земли. −1989. −№ 10. − С. 50−58.

3. Хачай О. А. О решении обратной задачи для трехмерных переменных электромагнитных полей // Изв. АН СССР, Физика Земли. −1990. −№ 2. – С. 55−59.

4. Хачай О. А., Хачай О. Ю., Хачай А. Ю. Новые методы геоинформатики мониторинга волновых полей в иерархических средах // Геоінформатика. – 2015. − № 3. − С. 45–51.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Тарасов А.Г.[1], Семухин Б.С.[2,3]

[1]*Новосибирский государственный технический университет, д. 20, пр. К. Маркса, г. Новосибирск, 630092, Российская Федерация, e-mail: info@electrocorr.ru*

[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

[3]*Томский государственный архитектурно-строительный университет, д. 2, пл. Соляная, г. Томск, 634003, Российская Федерация, e-mail: bss@ispms.tsc.ru*

Согласно действующим нормам ***сверхнормативным*** сроком службы воздушных линий (ВЛ) является возраст проводов, первичной арматуры и изоляции более 25 лет, а ***аварийным*** для всей ВЛ принят срок службы (возраст) опор более 40 лет, после которого требуется её замена или продление срока эксплуатации. Амортизируемым принят срок службы ВЛ – 50 лет, исходя из предполагаемого ресурса опор.

Возрастная структура действующих ВЛ электрических сетей такова, что на данный момент времени уже более 37 % ВЛ находятся в аварийном состоянии, а к 2020 году таких аварийных ВЛ будет уже более 50 %.

В связи с этим, исследование свойства долговечности ВЛ, выработавших нормативный срок службы, и разработка методологии продления их ресурса по данным диагностики является серьёзной проблемой.

В вопросах обеспечения долговечности и продления ресурса электросетевых конструкций электроустановок, к которым относятся опоры и фундаменты ВЛ, нормативная база электроэнергетики опирается на нормативную и методическую документацию, используемую в других отраслях, в частности в строительстве.

Поскольку «строительные» конструкции электроэнергетики, несут не только механическую нагрузку от работающего электротехнического оборудования электроустановок, но и являются естественными заземлителями этого оборудования, а так же находятся под влиянием агрессивной внешней среды и под воздействием рабочих и аварийных токов энергосистемы, то они должны быть устойчивыми к таким воздействиям.

Ряд аварий последних десятилетий, связанных с падением опор ВЛ на оттяжках из-за ускоренной коррозии анкерного узла их крепления, язвенным разрушением изолированных стальных трубопроводов систем аварийного пожаротушения на подстанциях, расплавлением бетона железобетонных опор ВЛ 6-10-35 кВ от токов замыкания на землю и др., показали, что причиной этих аварий является не учёт особенностей эксплуатации несущих металлических и железобетонных конструкций в электроустановках. А именно:

1. Опасность подземной коррозии под действием переменного тока трактуется с позиций электрохимической теории коррозии металла, что не соответствует фактам.
2. Опасность коррозии металла в почво-грунте, изученная на образцах малых размеров (точечных), ошибочно распространяется и на протяжённые конструкции.
3. Защитная способность цинковых покрытий в атмосфере ошибочно распространена и на подземную часть конструкций опор и фундаментов.
4. Опасность коррозии подземных конструкций электроустановок оценивается по СНиП без учёта влияния на эти конструкции аварийных и наведённых токов от электрической сети.
5. Неверно оценивается защитная способность антикоррозионных лакокрасочных или полимерных покрытий подземных конструкций электроустановок, работающих как естественные заземлители.
6. Не учитывается влияние на конструкции опор, фундаментов и грозозащитные тросы ВЛ блуждающих постоянных и переменных токов.

С точки зрения понятия долговечность, как свойства объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта, интегральное свойство долговечности ВЛ складывается из свойств, используемых материалов, влияния геометрической формы и размеров деталей, идущих на

изготовление и создание формы конструкции, распределения по ним механических и электрических нагрузок от собственного веса и функциональных воздействий всего сооружения, из свойств мест соединения деталей между собой, а также из свойств, характеристик и места приложения деструктивных воздействий окружающей среды на ВЛ.

УДК 621.373.1

СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТИМУЛИРОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Гагарин А.Ю., Сарычев В.Д., Романов Д.А., Коновалов С.В., Громов В.Е.

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

Генераторы тока и напряжения имеют разные сферы применения, в первых используется физический эффект от протекающего тока, а во вторых – от амплитуды напряжения [1].

Возможность использования генераторов в мобильных установках существенно зависит от их массогабаритов и мощности, потребляемой от источников первичного питания [2].

Целью работы являлось создание комплектного генератора токовых импульсов на базе современных высоковольтных импульсных конденсаторных сборок и микропроцессорной технике.

Исследования воздействия токовых импульсов на металлы, подвергающиеся усталостному нагружению, являются перспективными не только с позиции изменения физико-механических свойств, но и увеличения усталостного ресурса [3,4]. Для проведения этих исследований создан компактный генератор токовых импульсов со следующими параметрами: максимальная амплитуда тока – 8 кА, длительность импульса – 50 мкс, диапазон частот – 0–500 Гц, форма импульса – синусоидальная однополупериодная, напряжение питания – трехфазное – 380 В. Принцип действия генератора описан в [5].

Ввиду ограничения по току разряда, невозможности регулировать амплитуду и частоту тока была разработана схема модернизации данного генератора с использованием комплектных конденсаторных сборок. Данный генератор отличается тем, что в его состав входит от двух и более конденсаторов разной емкости, для варьирования собственной частоты. Обратная связь по напряжению зарядки конденсаторов открывает возможность варьировать плотность тока в цепи. Управление данной системой полностью выполнено на отечественной приборной базе [6]. Блок-схема нового генератора токовых импульсов (ГТИ) приведена на рисунке 1.

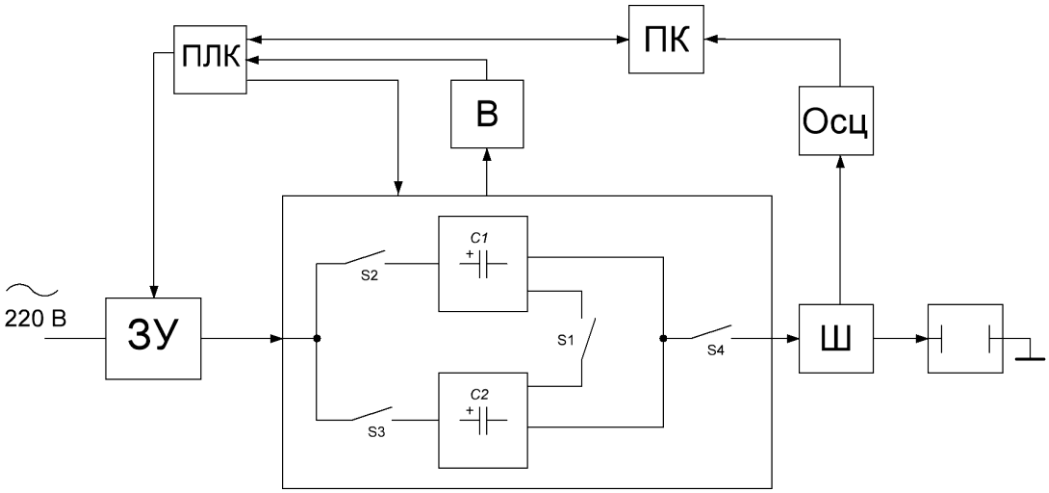


Рис. 1. Блок-схема модернизированного ГТИ

Принципиальным отличием является то, что использование ртутных вентилей требует изменения режима разряда конденсаторов. Для достижения однонаправленности тока, режим разряда конденсатора переводится в апериодический, добавляя сопротивление в цепь [7], также выполняющего роль измерительного шунта.

Если контур имеет сопротивление больше критического, то процесс разряда переходит от периодического к апериодическому:

$$r_{кр} = 2\sqrt{L/C} \quad (1)$$

где L, C – индуктивность и емкость контура, соответственно.

Положение переключателей S1, S2, S3 определяет схему соединения конденсаторов. Высоковольтные коммутаторные сборки варьируются в размерах от Ø150x175 мм до Ø212x250 мм, а весом от 6 до 15 кг, максимальный разрядный ток таких сборок от 70 до 200 кА, с собственным периодом разряда 260 – 600 нс.

Можно заключить, что новый генератор является мобильным, обеспечивающим возможность транспортировки и установки непосредственно в лабораторных условиях. Параметры регулирования позволяют обеспечить желаемые режимы обработки. Благодаря апериодическому разряду достигается однонаправленное движение тока. Универсальность ГТИ достигается тем, что все элементы можно подключать к сети 220 В.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-32-60032 мол_а_дк, № 16-32-60048 мол_а_дк, при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов и докторов наук МК-4166.2015.2, МД-2920.2015.8 и государственного задания № 3.1496.2014/К.

Литература

1. Мощные электроимпульсные системы / Е. Г. Крастелев, А. П. Лотоцкий, С. П. Масленников, Э. Я. Школьников // М. : МИФИ, 2008. – Т. 2. – 144 с.
2. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М. : Наука, 2004. – 704 с.
3. Соснин О. В., Козлов Э. В., Громов В. Е. Электростимулированная малоцикловая усталость. – М. : Недра, 2000. – 200 с.
4. Эволюция структурно-фазовых состояний стали 60ГС2 при многоцикловой усталости с токовой импульсной обработкой / С. В. Коновалов, В. В. Коваленко, Ю. Ф. Иванов, Э. В. Козлов, А. П. Семин, В. Я. Целлермаер, В. Е. Громов // Ресурс и диагностика материалов и конструкций : материалы IY Рос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2009. – С. 47.
5. Установка для исследования электростимулированной усталости / С. В. Коновалов, Е. В. Семакин, О. В. Соснин, В. Е. Громов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2000. – № 9. – С. 97–100.
6. Использование микропроцессора ПЛК 110-24.30.К-М для автоматизации электровзрывной установки ЭВУ 60/10 / А. Ю. Гагарин, Д. А. Романов, Ю. Д. Жмакин и др. // Промышленная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 38–40.
7. Основы теории цепей. Учебник для вузов. Изд.4-е, переработанное. – М. : Энергия, 1975. – 752 с.

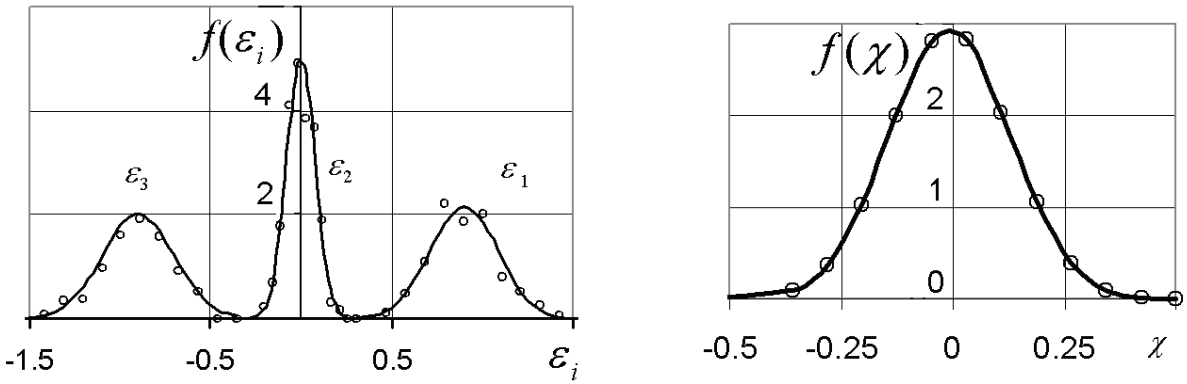
ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЗОДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЯ

Реков А.М.

Филиал Уральского федерального университета им. Первого Президента России Б.Н.Ельцина в г. Перовуральске, д. 1, пр. Космонавтов, г. Перовуральск, 623101 Российская Федерация,
e-mail: arekov@yandex.ru

Экспериментально, методом делительных сеток [1–5], определены параметры плотности распределения мезоодеформаций образцов из алюминия при плоском напряженно-деформированном состоянии. Рассчитана интенсивность главных мезодеформаций. С помощью аппликат нормированных автокорреляционных функций выполнена оценка корреляционной связи между деформациями отдельных зерен образца. Построены одномерные и двухточечные законы распределения мезодеформаций. Определены показатели напряженно-деформированного состояния элементов структуры (зерен).

Делительную сетку, с размером ячеек равным одному миллиметру, наносили фотоспособом на поверхность плоского образца. Размер стороны ячейки делительной сетки соизмерим со средним размером зерна. Границы зерен определяли травлением в стандартном растворе. Средний размер зерна определяли методом случайных секущих. Прокатку образцов алюминия, с размерами 40x110x4 мм, проводили в цилиндрических валках стана ДУО-120 с различной степенью обжатия от 20 до 50 %. Измерения координат узлов делительных сеток проводили по фотографиям на графическом экране системы AUTOCAD. По результатам измерений рассчитывали деформации ячеек сетки в плоскости образца: продольные (в направлении оси прокатки) – ε_{11}, поперечные – ε_{22} и сдвиговые – ε_{12}. Вычисляли главные мезодеформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ (величину главной деформации ε_3 находили из условия несжимаемости микрообъема $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$). Напряженно-деформированное состояние количественно оценивали помощью случайного параметра Надаи-Лоде χ в мезоструктуре. Результаты работы качественно хорошо совпадают с результатами аналогичных экспериментов, проведенных на образцах из сталей аустенитного класса [2-5].



а) главные мезодеформации; б) случайный параметр Надаи-Лоде.

Рис. Плотности распределения мезодеформаций

Основные результаты исследования

- Экспериментальные законы распределения мезодеформаций согласуются с распределением Гаусса.
- При прокатке алюминиевого образца в валках лабораторного стана ДУО-120 реализуется плоское напряженно - деформированное состояние, соответствующее чистому сдвигу (уширение при прокатке не превышает 1,5 – 2 %).
- Напряженно-деформированное состояние мезоообъемов образца их алюминия также преимущественно соответствует чистому сдвигу. Плотность распределения случайно-

го параметра Надаи-Лоде χ симметрична относительно оси ординат, проходящей через ноль.

- Поля мезодеформаций алюминия являются анизотропными - сечения нормированных автокорреляционных функций различны в ортогональных направлениях относительно оси прокатки образца.
- Результаты работы могут быть использованы для оценки вероятности появления деформаций в отдельных зернах, превышающих в 2 – 3 раза величину деформации всего образца из алюминия.

Литература

1. Вайнштейн А. А., Алехин А. Н. Основы теории упругости и пластичности с учетом неоднородности материала. – УГТУ-УПИ, 2004. – 236 с.
2. Реков А. М.. Корниенко В. Т., Корниенко Э. О // «Наука и технологии». Т. 1. – Краткие сообщения XXX Российской школы, посвященной 65-летию Победы. – Екатеринбург : УрО РАН, 2010. – С. 179-181.
3. Реков А. М. Двумерная плотность распределения деформированного состояния мезообъемов при плоской деформации // Математическое моделирование в естественных науках. – 2015. – Т. 1. –С. 373-376.
4. Реков А.М Локальные перегрузки мезоструктуры стальных образцов при плоской прокатке // Сталь. – 2013. – № 11. – С. 90-94.
5. Rekov A. M., Kornienko V. T., Kornienko E. O. Distribution of deformations and parameters of stress-strain state in steel KH18N10T // Metal Science and Heat Treatment. – 2013. – Vol. 55, № 7-8. – P. 451-455.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА

Карпов В.В., Семенов А.А.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), д. 4, ул. 2-я Красноармейская, г. Санкт-Петербург, 190005, Российская федерация, e-mail: vvkarpov@lan.spbgasu.ru, sw.semenov@gmail.com

Для прогнозирования ресурса работы оболочечных конструкций, применяемых в различных областях техники, необходимо проводить комплексное исследование их прочности и устойчивости.

Устойчивость оболочек исследовалась во многих публикациях [1, 2], притом в основном рассматривались изотропные оболочки постоянной толщины. Также имеются публикации по исследованию прочности оболочечных конструкций. Однако, комплексных исследований и прочности, и устойчивости оболочек в известной авторам литературе не обнаружено.

Целью данной работы является выявление закономерности появления потери устойчивости и потери прочности в зависимости от геометрических характеристик и некоторых обобщенных параметров пологих оболочечных конструкций.

Для проведения расчетов будем использовать математическую модель деформирования оболочки на основе гипотез Тимошенко, которая учитывает ортотропию материала, геометрическую нелинейность, поперечные сдвиги, наличие ребер, когда их контакт с обшивкой происходит по полосе, так, что учитываются сдвиговая и крутильная жесткости ребер [3].

К функционалу полной потенциальной энергии деформации оболочки применяется метод Ритца, и получается нелинейная система алгебраических уравнений относительно числовых параметров разложения функций перемещений и углов поворота нормали в ряды по известным аппроксимирующим функциям. Для решения нелинейной системы уравнений применяется метод продолжения решения по наилучшему параметру [4], что позволяет находить верхние и нижние критические нагрузки и исследовать закритическое поведение конструкции. Для анализа прочности оболочечных конструкций применяется несколько критериев прочности.

Для анализа очередности потери прочности и потери устойчивости различных оболочечных конструкций, необходимо ввести некоторые обобщенные параметры их характеристик. Таким обобщенным параметром может быть безразмерный параметр кривизны $k_\xi = a^2 / Rh$, но один этот параметр не может полностью характеризовать любую конструкцию. Будем еще задаваться определенным значением безразмерного радиуса кривизны оболочки $\overline{R} = R/h$ и $\overline{a} = a/h$

Для наиболее вероятных сочетаний $\overline{R}$ и $\overline{a}$ (всего рассмотрено 16 вариантов) найдем безразмерные значения критических нагрузок потери устойчивости $\overline{P}_{kr}$ и предельных нагрузок потери прочности $\overline{P}_{pr}$ и выясним очередность наступления потери прочности и потери устойчивости, построив графики зависимости $\overline{P}_{kr}$ от $\lg k_\xi$ и $\overline{P}_{pr}$ от $\lg k_\xi$.

Расчеты показали, что с увеличением значения $\overline{R}$ конструкция становится более гибкая, поэтому потеря устойчивости происходит раньше потери прочности; с уменьшением величины $\overline{R}$ конструкция становится более жесткая, поэтому потеря прочности происходит раньше потери устойчивости (потеря устойчивости может и не произойти). Качественно этот факт не является новым. Однако, в данном случае получены и количественные закономерности этого явления для широкого класса наиболее реальных пологих оболочек.

В результате проведенных исследований прочности и устойчивости для пологих оболочек из стеклопластика были выявлены количественные оценки закономерностей потери прочности и потери устойчивости оболочек в зависимости от обобщенного параметра k_ξ. и радиусов кривизны.

Литература

1 Григолюк Э. И., Лопаницын Е. А. Влияние осесимметричных начальных неправильностей сферической оболочки на ее критическую нагрузку // Известия МГТУ «МАМИ». – 2008. – № 1(5). – С. 233-246.

2 Wang X. Nonlinear stability analysis of thin doubly curved orthotropic shallow shells by the differential quadrature method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2007. – Vol. 196. – P. 2242–2251. – DOI:10.1016/j.cma.2006.11.009.

3 Карпов В. В. Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения: в 2 ч. Ч.1: Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения. – М. : Физматлит, 2010. – 288 с.

4 Kuznetsov E. B. Continuation of solutions in multiparameter approximation of curves and surfaces // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2012. – Vol. 52, no. 8. – P. 1149-1162. – DOI: 10.1134/S0965542512080076.

УДК 534.2: 535.4

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ЛЭМБА

Толипов Х.Б.

Южно-Уральский Государственный Университет (НИУ), Физический факультет, д.76, г. Челябинск, пр. Ленина, 454080, Российская Федерация, e-mail: thb@susu.ac.ru

Описана экспериментальная установка, позволяющая определять толщину тонких металлических пленок. Предложенный метод основан на зависимости фазовой скорости распространяющихся вдоль пленки гармонических антисимметричных волн Лэмба от ее толщины. Точность измерения составила 8 % и практически не зависела от толщины пленки.

Ключевые слова: тонкие пленки, волновое поле, упругие волны Лэмба, пьезодатчики.

Задача определения толщины тонких металлических пленок является одной из актуальных проблем микро-, наноэлектроники. Известные методы контроля толщины пленок, такие как микровзвешивание, измерение электросопротивления, растровая и трансмиссионная электронная микроскопия, и др. [1, 2], не обеспечивают требуемой точности измерения и характеризуются высокими трудозатратами.

Широко используемые акустические методы, основанные на возбуждении объемных волн, например, эхо-импульсный способ [3], применяются, в основном, для контроля массивных изделий, толщина которых значительно больше длины акустической волны.

Оценим возможность применения этого метода для измерения толщины тонких изделий. Длина волны, определяемая по формуле: $\lambda = v_t / f$ (где v_t – скорость сдвиговой волны; f – частота колебаний), при максимальной частоте волн, возбуждаемых серийно выпускающимися пьезодатчиками (f_{max} = 10 МГц) и скорости сдвиговой волны в металлах – ~ 3000 м/с, составляет ~ 0,3 мм. Эта величина и является нижним пределом толщины пленок, которые можно измерить этим методом. Отметим также, что при приближении толщины пленки к этому пределу резко возрастает погрешность измерения.

В настоящей работе разработана методика и описана несложная лабораторная установка для измерения толщины тонких металлических пленок нанометрового размера, использующая стандартные приборы и позволяющая быстро и с достаточной точностью проводить операции.

Для решения поставленной задачи были использованы акустические антисимметричные волны Лэмба [4], скорость распространения которых вдоль пленки зависит от ее толщины (Рис. 1). Общеизвестно, что скорость распространения волны определяется временем ее прохождения между двумя пьезодатчиками, расположенными на определенном расстоянии друг от друга (база измерения). Нами установлено, что вследствие явления дисперсии, импульсный метод измерения скорости дает большую погрешность. Это связано с тем, что импульс волны, представляющий собой, по сути, волновой пакет, по ходу движения существенно изменяется по форме, что приводит к неопределенности измерения времени между исходным и пришедшим импульсами. Для исключения этой неопределенности был использован непрерывный режим возбуждения гармонических акустических волн строго определенной частоты, позволяющий непосредственно определять фазовую скорость волны [5].

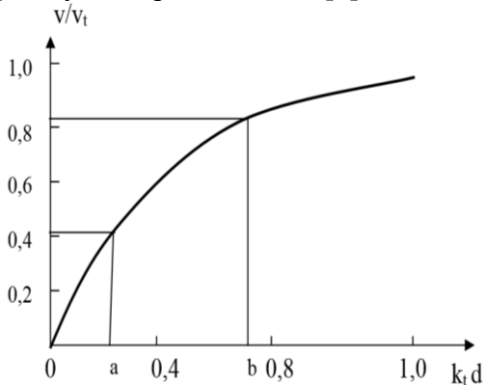


Рис. 1. Зависимость относительной скорости ультразвуковой антисимметричной волны Лэмба от толщины металлических пленок

Лабораторная установка состоит из генератора стандартных сигналов ГСС Г4–18А, высоковольтного усилителя, излучающего и приемного пьезодатчиков марки П-121 и двухлучевого осциллографа TDS-2202 (рис. 2).

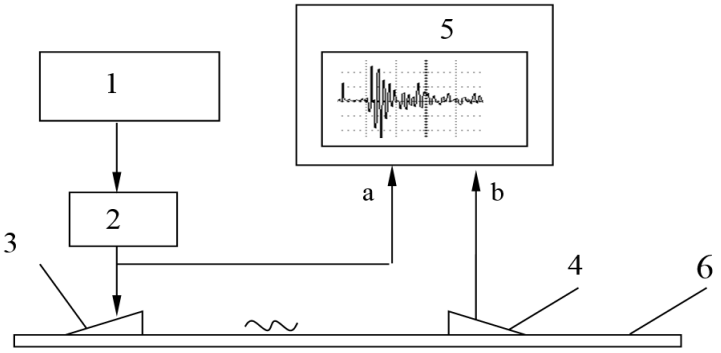


Рис. 2. Блок-схема лабораторной установки. 1 – генератор стандартных сигналов Г4 – 18А, 2 – высоковольтный усилитель, 3, 4 – излучатель и приемник ультразвуковых волн, 5 – осциллограф TDS-2202C, 6 – алюминиевая пленка. Расстояние между датчиками – 50 мм

Монохроматическая волна с фиксированной частотой, возбуждается излучающим пьезодатчиком 3, распространяется по тонкой пленке, затем фиксируется приемным пьезодатчиком 4. Сигналы от этих пьезодатчиков поступают на различные входы двухлучевого осциллографа, на котором определяется время прохождения волны.

На рис. 3 приведена осциллограмма, полученная при прохождении волны Лэмба вдоль алюминиевой пленки толщиной 53 мкм. Частота колебаний волны составила 1,8 МГц, а база измерения имела длину 50 мм.

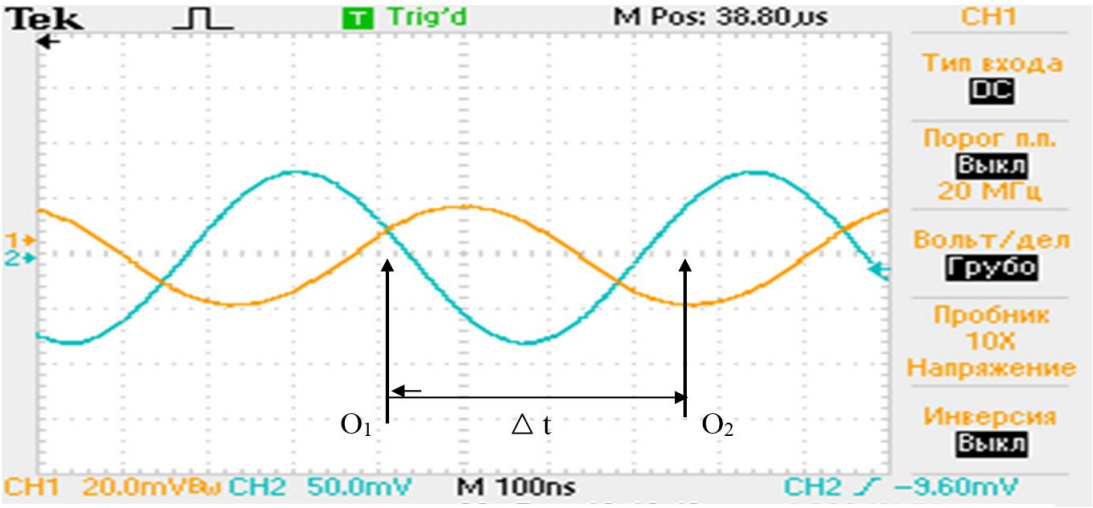


Рис. 3. Осциллограмма сигналов от двух пьезодатчиков. Развертка 100 нс/дел., время между импульсами 1 и 2 составляет Δ t = 3,5 мкс

Ошибка в определении скорости v составляет 4 %. Для определения погрешности толщины, дисперсионную зависимость скорости от толщины аппроксимируем в виде:

$$v = 1 - \exp(-0{,}5\, k_t\, d), \quad (1)$$

где $k_t = \omega/v_t$ – волновое число, ω – круговая частота, v_t – скорость сдвиговой волны, d – толщина пленки.

Тогда относительная погрешность принимает вид:

$$\frac{\Delta d}{d} = \Delta v \frac{\left(e^{-0{,}5 k_t d}\right)}{0{,}5 v_t \left(-\ln\left(1 - \frac{v}{v_t}\right)\right)}. \quad (2)$$

Точность измерения толщины измерения пленки при этих параметрах составляет 8 %. Согласно (2), основной вклад в погрешность измерения толщины вносит неточность в измерении скорости. Также на точность измерения влияет также измеряемая толщина, связанная с не-

линейным характером изменения со скоростью волны в пленке (рис.1, точки a, b). Будем считать, что погрешность изменения частоты генератора пренебрежимо мала. Тогда поднять точность определения скорости можно увеличением базы измерения, что ведет к росту длительности прохождения, и соответственно с более точным измерением времени. Если при уменьшении толщины увеличивать частоту, так, чтобы произведение k_t d= $\omega d/v_t$ оставалось неизменным, относительная погрешность измерения практически не будет зависеть от толщины.

Таким образом, разработана и испытана специализированная установка для определения толщины тонких металлических пленок. Метод основан на использовании зависимости скорости гармонических антисимметричных акустических волн Лэмба от толщины.

Литература

1. Готра З. Ю. Контроль технологии гибридных интегральных схем Львов, 1981.
2. Технология тонких пленок : Справочник под ред. Л. Майсенла, Р. Гленга. – В 2 т. – М., 1977 г.
3. Королев М.В. Эхо-импульсные толщиномеры. – М. : Машиностроение, 1980.
4. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – М. : Наука, 1966.
5. Толипов Х. Б., Клещев Д. Г. Ультразвуковой способ измерения толщины тонких пленок. Заявка № 2016100979 от 13.01.2016.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Шилько Е.В.[1,2], Астафуров С.В.[1], Григорьев А.С.[1], Овчаренко В.Е.[1,3], Yu Bao Hai[4], Xiong Tianying[4], Псахье С.Г.[1,3]

[1]*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, д. 2/4, пр. Академический, г.Томск, 634021, Российская Федерация, e-mail: shilko@ispms.tsc.ru*

[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, д. 36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация*

[3]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация, e-mail: ove45@mail.ru*

[4]*Институт исследований металлов АН КНР, д. 72, ул. Культуры, г. Шеньян, 110016, Китай, e-mail: bhyu@imr.ac.cn*

Металлокерамические материалы на основе тугоплавких и высокотвердых химических соединений с металлическим связующим характеризуются высокими значениями механических и триботехнических характеристик. Это обусловливает их широкое применение в качестве функциональных материалов, используемых в критических узлах высоконагруженных трибомеханических систем. Повышение механических свойств металлокерамических композитов осуществляется через направленное изменение параметров внутренней структуры на микро- и наномасштабных уровнях. Ключевым структурным элементом на этих масштабах являются границы раздела керамической и металлической фаз (интерфейсы). Их механические и геометрические характеристики оказывают значительное, а во многих случаях и определяющее влияние на механические свойства композитов. Характер зависимостей механических свойств композитов от свойств межфазных интерфейсов, как правило, является нелинейным и зачастую – немонотонным. Поэтому для выявления вида таких зависимостей и их обобщения применяется компьютерное моделирование с применением моделей, в которых межфазные границы учитываются явным образом. В настоящее время получили применение разнообразные модели межфазных границ, различающиеся по степени точности и детализации описания.

Целью представляемой работы является проведение сравнительного анализа возможностей наиболее распространенных моделей межфазных границ и влияния параметров этих моделей на микроскопические механические свойства металлокерамических материалов. Исследование проведено путем компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов, являющегося представителем класса методов дискретных элементов.

Рассмотрены три типа моделей межфазных границ:

1. «Бесконечно тонкая» граница раздела (когезионный интерфейс), единственными характеристиками которой являются прочностные.

2. Протяженная интерфейсная зона с однородными структурой и свойствами, геометрические и механические свойства которой определяются на основе подхода геометрически необходимых дислокаций (ГНД).

3. Протяженная интерфейсная зона, характеризующейся градиентом механических свойств. Данная модель дополнительно учитывает механизмы формирования внутренней структуры интерфейса в процессе получения композита, связанные с диффузией и/или перемешиванием (в случае формирования областей расплава) компонентов и приводящие к образованию твердых растворов и/или вторичных наночастиц.

Результаты моделирования показали существенно ограниченные возможности модели когезионного интерфейса для описания влияния свойств границ раздела на механические свойства композиционного материала на микроуровне. В частности, варьирование прочностных параметров межфазной границы оказывает влияние на прочность и особенности разрушения композитов только в интервале низких значений прочности адгезии, не превышающих прочность керамической фазы на разрыв. При этом возможность управления реологическими свойствами композита отсутствует.

Как свидетельствуют результаты численного изучения, эффективным инструментом для анализа возможности управления реологическими свойствами композита изменением характеристик межфазных интерфейсов являются модели протяженных интерфейсных зон. Так, модели однородной интерфейсной зоны дают возможность исследовать влияние термических условий получения композита и различия упругих констант и пределов упругости фаз (через плотность ГНД, определяющих предел текучести и коэффициент деформационного упрочнения материала интерфейса) на «интегральные» реологические характеристики и величину прочности композита. В частности, с использованием данной модели показано, что ведущая роль в упрочнении металлокерамического композита с протяженными интерфейсными зонами принадлежит «исходным» ГНД, сформировавшимся в процессе его получения.

В случаях, когда межфазные границы раздела характеризуются градиентом элементного состава, дефектности и, как следствие, механических свойств при переходе от керамических включений к металлическому связующему, наиболее адекватной является «градиентная» модель интерфейсной зоны. Качественным отличием такой модели от предшествующей является учет изменения концентрации дефектов, примесей, наночастиц при переходе от поверхности керамического включения к связующему. Результаты моделирования с использованием данной модели показали, что распределение напряжений и деформаций и, как следствие прочность и вязкость разрушения металлокерамических композитов определяются не только степенью упрочнения, но в не меньшей степени и величиной градиента механических свойств интерфейса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020гг» (Соглашение №14.613.21.0049 от 11.11.2015г, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61315X0049).

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В БИМЕТАЛЛЕ СТ.3+Х18Н8 НА МАКРОМАСШТАБНОМ УРОВНЕ

Ли Ю.В.[1], Баранникова С.А.[1,2], Бочкарева А.В.[1], Лунев А.Г.[1], Шляхова Г.В.[1], Зуев Л.Б. [1,2]

[1]*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Российская Федерация, 634055*
[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация 634050*
e-mail: jul2207@mail.ru, bsa@ispms.ru, avb@ispms.ru, agl@ispms.ru, shgv@ispms.tsc.ru, lbz@ispms.ru

В настоящее время биметаллы занимают важное место в современной промышленности, так как присутствующие в них свойства разнородных материалов, дополняя друг друга, образуют новую, нехарактерную для известных монометаллов и сплавов совокупность свойств. Однако существует ряд недостатков технологических процессов производства биметаллов, поводящих к снижению их качества. В связи с этим необходимо расширение знаний о процессах соединения разнородных металлов их совместной пластической деформации и изменении свойств в процессе эксплуатации [1].

Изучение природы пластической деформации твердых тел привело к заключению о том, что пластическое течение неоднородно на любом своем этапе [2]. Использование универсального измерительного комплекса ALMEC-tv позволяет проследить эволюцию распространения зон локализации в материале и определить особенности их распространения при испытании материала на одноосное растяжение, а также определить параметры локализации пластического течения.

Для исследования был выбран биметаллический материал Ст.3+Х18Н8, полученный методом заливки с последующей прокаткой на необходимую толщину 8 мм. Толщина основного слоя составляла 0,6 мм.

Предварительно подготовленные образцы в форме двойной лопатки с размерами рабочей части 50×8×2 мм растягивались при Т=300К со скоростью $6{,}67\times10^{-5}$ $с^{-1}$ на испытательной машине «Walter+Bai».

Анализ стадийности кривых нагружения по характеру изменения коэффициента деформационного упрочнения и показателя деформационного упрочнения показал, что характерной особенностью деформационных кривых рассматриваемого материала является наличие трех стадий пластического течения: стадии линейного деформационного упрочнения, стадии параболического деформационного (Тейлоровского) упрочнения и стадия предразрушения.

Пластическая деформация материала начинается с зарождения на границах раздела биметалла полосы Людерса. Однако высокопрочный плакирующий металл Х18Н8 препятствует распространению полосы Людерса с постоянной скоростью от захвата машины как базового концентратора напряжений. Поэтому движение начальной полосы происходит скачкообразно - по мере зарождения и прохождения через все сечение образца других полос Людерса от границ раздела “плакирующий металл – основной металл“.

Использованием автоматизированного комплекса ALMEC-tv позволило определить основные пространственно- временные характеристики распространения зон локализовации: скорость распространения V_{aw} и пространственный период λ.

Таким образом, в настоящей работе рассмотрено распространение фронтов локализации пластической деформации двухслойного металлического композита. Показано, что на всем протяжении пластического течения очаги локализации пластической деформации в основном металле формируются и эволюционируют закономерным образом.

Однако, вопрос о распространении очагов локализации пластической деформации в промежуточном слое «плакирующий металл – основной металл» требует дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2015-2020 гг. и Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2016 г.

Литература

1. Трыков Ю.П., Сергиенко А.С., Гуревич Л.М., С.А Булаева., Даненко В.Ф. Изменение микромеханических свойств биметаллической проволоки при деформировании // Известия Вологоградского государственного технического университета / Волг. ГТУ. – Волгоград. – 2009. – Т.59. – № 11. – С. 54.

2. Panin V.E. Plastic deformation and fracture of solid at the mesoscale level // Mat. Sci. Eng. A. – 2001. – V. 319–321. – P. 197–200.

ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ МИКРОСТРУКТУРНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

Волков С.С.[1], Волкова Т.А.[2]

[1] *Институт машиноведения УрО РАН, д.34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620219, Российская Федерация, e-mail: volkovss48@yandex.ru*

[2] *Уральский государственный университет путей сообщения, д. 66, ул. Колмогорова, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация, e-mail: tvolkova@usurt.ru*

Зависимость между напряжениями и деформациями изменяется при нагружении, так как с ростом нагрузки изменяются свойства материала. Незначительная вначале микроповрежденность развивается и накапливается. Относительное число разрушенных элементов микроструктуры находится с помощью микроструктурного условия прочности. Это условие зависит от вида нагружения и включает параметры распределения случайных микроструктурных напряжений материала. Зная поврежденность, строим участки диаграммы деформирования с учетом изменившихся свойств деформируемой среды [1]. Целью работы является создание математической модели для расчета зависимости между деформациями и напряжениями, учитывающей различные варианты разрушения элементов микроструктуры металлов в процессе нагружения.

Рассматривается модель микронеоднородной среды со случайными свойствами элементов микроструктуры. Элементы на макроуровне обладают детерминированными механическими свойствами. Среда является макрооднородной и макроизотропной. Предполагается, что на макроуровне найдено решение краевой задачи и известен тензор макроскопических деформаций **e**. Элементы микроструктуры – это элементы второго порядка малости. Они обладают случайными деформационными и прочностными свойствами. Повреждения микроструктуры представлены в виде разрыхлений, пор и сдвигов. Случайная индикаторная функция повреждённости $\omega(X)$ равна единице, если в элементе X произошло разрушение, и равна нулю, если сохранилась сплошность материала.

Модули упругости в повреждениях в виде пор принимаются равными нулю. Разрушенный таким образом элемент микроструктуры не может нести нагрузку. Повреждённость может быть представлена также компактными микро разрыхлениями по границам зерен [2]. Металлическая составляющая в микрорыхлотах составляет 70–80 % их объёма. Микрорыхлоты превращаются в пустоты при многократном повторении операции «полировка и травление». Степень разрыхлённости отдельных элементов также считаем случайной. Разрыхлённость приводит к потере несущей способности элемента и уменьшает объёмный и сдвиговый модули деформации элементов микроструктуры. На уровне микроструктуры происходит множество микроотрывов и микросдвигов. В этом случае в расчеты вводятся также случайные индикаторные функции разрушения элемента микроструктуры при отрыве или сдвиге.

Микроструктурное условие прочности в элементе X представляет собой разницу между случайным эквивалентным напряжением $\sigma(X)$ и случайным пределом прочности элементов микроструктуры $S(X)$: $w(X) = \sigma(X) - S(X)$. Вероятность превышения напряжением предела прочности в данном элементе определяет вероятность разрушения этого элемента и относительную поврежденность q на микроуровне.

Макромодули упругости материала рассчитываются в зависимости от относительной поврежденности и преобладающего вида разрушения элементов микроструктуры. Расчет поврежденности дает возможность на каждом этапе нагружения находить макроскопические свойства композита и строить соответствующие участки диаграммы деформирования.

В результате математического моделирования процессов микроструктурного разрушения металлов получены формулы для расчета зависимости между деформациями и напряжениями. Участки диаграммы деформирования рассчитываются с учетом изменяющихся свойств. Показано, что свойства микроструктуры материала существенно влияют на поведение материала и вид диаграммы деформирования. Приведены числовые примеры и сравнение с данными эксперимента. Математические модели, применяемые для расчета диа-

граммы деформирования, позволяют исследовать достаточно широкий диапазон свойств материалов и различные виды напряженного состояния.

Литература

1. T.A. Volkova, S.S. Volkov, Microstructure damage related to stress- strain curve for grain composites. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Elsevier. Volume 52, Issue 2, October 2009, pp. 83-90

2. Пермикин В.С. К механизму разрушения стали при высокотемпературной ползучести // Механика микронеоднородных материалов и разрушение; Екатеринбург: Вестник УГТУ–УПИ, 2006, №11(82). С. 104–109.

VIBRATIONS OF SHELLS WITH DYNAMICAL ASYMMETRY

Seregin S.V.

Komsomolsk-na-Amure State Technical University, 27, Lenin Avenue, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russian Federation, e-mail: Seregin-komshome@yandex.ru

The thin cylindrical shells are widely used in aviation, rocketry, space and other industries. Real shells have small initial inevitable deviations from the ideal of the round form – w_0. These deviations have a strong influence on stability of shells and their dynamic behavior. They are known, to lead to the splitting bending frequency spectrum. Which is undesirable from the viewpoint of dynamic strength and reliability design.

According to the traditional research [1] considered that the additional mass leads to decrease lesser of the own frequency. Imperfections forms can lead to a decrease or increase in frequency. Consequently, their joint influence can eliminate the effect of splitting bending frequency spectrum. Furthermore, in [1] formula was obtained. This formula shows that the elimination of bending frequency spectrum is possible with certain imperfection amplitude ratio and the value of added mass for all shells.

In the works of the author shows, that the effect of reducing frequency of vibrations shell with adjoined mass, depends not only on the size added mass, as commonly believed at the present time [1], but also on the geometric and wave shell parameters [2-6]. Is refined mathematical model. The results of analytical studies [7-10] qualitatively are coordinated with numerical calculations. This means that the effect of splitting bending frequency spectrum can not be characterized only by the ratio of the amplitude of imperfections and attached mass.

In [11-13] studied the simpler (limit) the problem - vibrations infinitely long circular cylindrical shell - ring located in the plane strain conditions. Detected additional zone splitting bending frequency spectrum of real shell. This is not reflected in the well-known studies. When an even number of constituency waves initial imperfections n_0 тnoticeable splitting of frequency spectrum is observed both at $n = n_0 / 2$ and at $n = n_0$, where n - the number of dynamic deformation waves. In this case, in the second case detuning natural frequencies somewhat higher than in the first. In other cases formation of wave splitting frequency spectrum is virtually absent. In the case where $n = n_0 / 2$ large of the split natural frequencies larger than the frequency vibrations of the ring are geometrically perfect. When $n = n_0 / 2$ larger of the split natural frequencies larger than the frequency vibrations of geometrically perfect rings.

Calculations have shown that the selection of attachment points and her attached mass quantities undesirable from the viewpoint of dynamic strength and reliability of construction, the effect of splitting frequency spectrum can not be completely eliminated.

«The reported study was supported by RFBR, research project No. 16-31-00045 мол_а» («Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-00045 мол_а»).

Литература

1. Кубенко В.Д., Ковальчук П.С., Краснопольская Т.С. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек. – Киев: Наукова думка, 1984. – 220 с.

2. Серёгин С.В., Лейзерович Г.С. Влияние присоединенной массы на динамические характеристики тонкой оболочки // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – № 4. – С. 83–89.

3. Серёгин С.В. Исследование динамических характеристик оболочек с отверстиями и присоединенной массой // Вестник МГСУ. – 2014. – № 4. – С. 52–58.

4. Серёгин С.В. Влияние присоединенного тела на частоты и формы свободных колебаний цилиндрических оболочек // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 3. – С. 35–39.

5. Серёгин С.В. Влияние площади контакта и величины линейно распределенной и сосредоточенной массы с круговой цилиндрической оболочкой на частоты и формы свободных колебаний // Вестник МГСУ. – 2014. – № 7. – С. 64–74.

6. Серёгин С.В. Об эффекте расщепления изгибного частотного спектра тонких круговых цилиндрических оболочек, несущих присоединенную массу // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 6 (257). – С. 59–61.

7. Серёгин С.В. Свободные изгибно-радиальные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, несущей присоединенную массу // Вестник МГСУ. – 2014. – № 11. – С. 74–81.

8. Серёгин С.В. Численное и аналитическое исследование свободных колебаний круговых цилиндрических оболочек, несущих присоединенную массу, линейно распределенную вдоль образующей // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7. – № 4. – С. 378–384.

9. Серегин С.В. Свободные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, ослабленной отверстием // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2015. – № 3. – С. 9–13.

10. Seregin, S.V. Free vibrations of a thin circular cylindrical shell weakened by a hole // Russian Aeronautics. – 2015. – 58 (3), pp. 258–262.

11. Лейзерович Г.С., Приходько Н.Б., Серегин С.В. О влиянии малой присоединенной массы на колебания разнотолщинного кругового кольца // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 4. – С. 38–41.

12. Лейзерович Г.С., Приходько Н.Б. Серёгин С.В. О влиянии малой присоединенной массы на расщепление частотного спектра кругового кольца с начальными неправильностями // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – № 6. – С. 49–51.

13. Серёгин С.В. Лейзерович Г.С. Свободные колебания бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки с начальными неправильностями и малой присоединенной массой // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2014. – Т. 1. – № 4 (20). – С. 36-43.

ПОВЫШЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО ПЕРИОДА ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ

Каржавин В.В.[1], Сенив В.М.[2], Соколов А.В.[3], Шлеенков А.С.[4]

[1]*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация, т. 375-86-94, e-mail:* politic@rambler.ru

[2] *ГНО ОО «Когалым НПО-Сервис», Тюменская обл., г. Когалым, Российская Федерация, т. 44-801, e-mail:* Seniv.vladivir@mpos.ru

[3] *ООО НПП «ПИКА», г. Пермь, Российская Федерация, т. 79026499931*

[4] *Институт физики металлов имени М.Н.Михеева, УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация, т. 374-12-11, e-mail:* shleenkov@imp.uran.ru

Добыча нефти при помощи штанговых глубинных насосов (ШГН) – является самым распространённым способом искусственного подъёма нефти, что объясняется их простотой, эффективностью и надёжностью. В настоящее время как минимум две трети фонда действующих скважин эксплуатируются установками ШГН.

Глубинный штанговый насос в простейшем виде состоит из плунжера, перемещающегося вверх-вниз по хорошо подогнанному и обработанному цилиндру; насос снабжён двумя клапанами, обеспечивающими движение жидкости вверх, но не вниз.

Наиболее сложным при изготовлении цилиндров и в то же время наиболее сильно влияющим на долговечность, а, следовательно, и на межремонтный период (МРП) всего насоса, является обеспечение высокой прямолинейности канала. Исследования показали, что при увеличении величины отклонения от прямолинейности с 0,1 (требование допуска) до 0,15 МРП насосов, уменьшается в 2 раза независимо от типоразмера насосов [1].

По традиционной технологии, принятой на большинстве отечественных заводах-изготовителях ШГН, значительная не прямолинейность цилиндров насосов вызвана тем, что этот параметр контролируют лишь простейшими приборами, представляющими собой стержень с опорами по концам и датчиком прогиба в середине стержня [2].

Учитывая важность контроля прямолинейности цилиндров, в значительной мере, влияющей на МРП насосов, на всех предприятиях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» уже более 10 лет измерение прямолинейности цилиндров ШГН при их ремонте производится лазерными приборами «ПИКА-ДН1», свободными от указанных выше недостатков и включёнными в Госреестр средств измерений РФ. В данных приборах, основанных на измерении общей не прямолинейности цилиндра по всей его длине, включая концевые участки, измерения выполняются с высокой точностью [3]. Это обеспечивается тем, что положение оси канала цилиндра определяется по вершине оптической призмы, от которой отражается лазерный луч, а опорные элементы расположены в той же плоскости, что и вершина призмы. Кроме величины отклонения от прямолинейности канала на базе в 1 метр, данные приборы дают графики прямолинейности по всей длине канала контролируемого цилиндра, что позволяет легко определить возможное искривление его при неправильной транспортировке и монтаже. Также приборы «ПИКА-ДН1» позволяют одновременно измерять и диаметр канала цилиндра в различных сечениях, а, следовательно анализировать степень износа канала.

Проводимый контроль указанных параметров важен ещё и потому, что новый ГОСТ существенно снизил требования к качеству изготовления ШГН, прежде всего к прямолинейности каналов цилиндров. Это требует повышенного внимания к сервисному обслуживанию насосов и обязывает внедрить 100%-й входной контроль насосов. Учитывая, что в условиях Западной Сибири стоимость ремонта насоса, включая монтаж и демонтаж его из скважины, приблизительно в 10 раз превосходит стоимость самого насоса, входной контроль лазерными приборами «ПИКА-ДН1» позволит увеличить МРП насосов, даст значительную экономию средств, улучшит экологию среды.

Литература

1. Карпухин И.В., Давлетшин И.М., Левин Ю.Л., Соколов А.В. Контроль прямолинейности цилиндров и перспективы повышения ресурса работоспособности штанговых глубинных насосов//Нефть и капитал, 2002, № 5, с. 86–89.

2. Соколов А.В. Обеспечение прямолинейности каналов при производстве трубных заготовок // Химическое и нефтехимическое машиностроение, 2000, № 12, с. 48–49.

3. Соколов А.В., Надымов Н.П., Ярыгин В.Н. Современная технология и оборудование для изготовления, входного контроля и ремонта штанговых глубинных насосов // Нефть и капитал, 1998, № 2, с. 88–89.

IMPROVING THE OVERHAUL PERIOD OF SUCKER ROD PUMPS

Karzhavin V.V.[1], Seniv V.M.[2], Sokolov A.V.[3], Shleenkov A.S.[4]

[1]*Ural Federal University named after the first President Of Russia B. N. Yeltsin, 620078, Ekaterinburg, ul. Komsomolskaya, 78, apt. 120, tel. 375-86-94, e-mail: politic@rambler.ru*

[2]*"NGO Kogalym-Service" Ltd., Tyumen region, Kogalym , tel. 44-801, e-mail: Seniv.vladivir@mpos.ru*

[3]*"PIKA" Ltd., Perm, tel.79026499931*

[4]*Institute of Physics of Metals named after M.N.Mikheeva, UrB RASEkaterinburg, tel.374-12-11, e-mail: shleenkov@imp.uran.ru*

Oil extraction by means of sucker rod pumps (SRP system) is the most common method of artificial oil lifting due to its simplicity, efficiency and reliability. Currently at least two-thirds of all existing wells are operated by sucker rod pump installations.

The sucker rod pump in its simplest form consists of a plunger that moves up and down along a well-fitted treated cylinder; the pump has two valves which provide the movement of fluid upwards, but not downwards.

Providing the alignment of the channel is the most difficult step in the manufacture of cylinders and at the same time the most important criterion that considerably influences the durability, and, consequently, the overhaul period of the pump. Recent studies have shown that by increasing the linearity deviation from 0.1 (a valid requirement) to 0.15, the overhaul period of all pumps is reduced twice as much, regardless of their size [1].

According to the traditional technology adopted by most domestic RSP manufacturers, the significant imprecision in the process of cylinder making is caused by the fact that this parameter is only controlled by the simplest devices consisting of a rod with bearings on the ends and a deflection sensor in the middle [2].

Taking into consideration the extreme importance of the cylinder alignment, which significantly affects the overhaul period of sucker rod pumps, all the enterprises of LLC "LUKOIL-Western Siberia" have been measuring and controlling this parameter with the help of special laser devices “PIKA-DN1”, free from the above disadvantages and included in the State Register of Measuring of the Russian Federation. The mentioned laser devices measure the overall precision level of the cylinder along its entire length, including the end portions, with high accuracy [3]. Such accuracy in measurements is achieved due to the fact that the position of the channel axis of the cylinder is defined by the top of the optical prism, from which the laser beam is reflected, and the supporting elements are located in the same plane as the vertex of the prism. Except for the alignment deviation value of the channel at the base in 1 meter, these devices show the straightness graphs over the entire length of the channel of the controlled cylinder, which makes it easy to identify a possible deformation of the item while its improper transportation and installation. Moreover, such devices as “PIKA-DN1” give a chance to measure the bore diameter of the cylinder at different cross sections and therefore enable to analyze the degree of wear of the channel.

The ongoing control of the mentioned parameters is also important because a new state standard has significantly reduced the quality requirements for manufacturing sucker rod pumps, particularly the channel alignment of cylinders. This requires an increased attention to the maintenance of pumps and obliges to implement their 100% input control.

Considering the fact that in conditions of Western Siberia the cost of repairing the pump, including its installation and later well removal, is approximately 10 times higher than the cost of the pump itself, laser input control performed by “PIK-DN1” devices will increase the overhault period of sucker rod pumps, give significant cost savings and improve the ecology of the environment.

References

1. Karpukhin I.V., Davletshin I.M., Levin Yu.L., Sokolov A.V. Control the alignment of cylinders and the prospects for improving the resource efficiency of sucker rod pumps//Oil and capital, 2002, № 5, pp. 86–89.

2. Sokolov A.V. The straightness of the channels in the production of pipe shells // Chemical and petrochemical engineering, 2000, № 12, pp. 48–49.

3. Sokolov A.V., Nadymov N.P., Yarygin V.N. Modern technology and equipment for the manufacture, acceptance control and repairs of sucker rod pumps// Oil and capital, 1998, №2, p. 88–89.

ПОЛНОЕ АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ М. УИЛЬЯМСА У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД, ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Степанова Л.В., Росляков П.С.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), д. 34, Московское шоссе, г. Самара, 443086, Российская Федерация, e-mail: stepanovalv@samsu.ru, roslyakovps@samsu.ru

В последнее время в механике разрушения было показано, что инженерные приложения традиционной линейной механики разрушения, базирующиеся на одном параметре – коэффициенте интенсивности напряжений, в качестве критерия распространения дефекта, требуют усовершенствования и учета высших приближений в полном асимптотическом разложении М. Уильямса. Целью настоящей работы является многопараметрическое описание поля напряжений в линейно упругой пластине с двумя коллинеарными трещинами и получение аналитических выражений для коэффициентов многочленных асимптотических разложений компонент тензора напряжений. Асимптотическое решение строится на основе комплексных решений плоской задачи теории упругости для тел с трещинами, позволяющих выполнить анализ высших приближений в полном асимптотическом решении М. Уильямса. С практической точки зрения важно знать 1) зависимость амплитудных множителей (коэффициентов разложения) от длины трещин и от системы приложенных нагрузок; 2) количество слагаемых в полном асимптотическом разложении М. Уильямса, которое необходимо удерживать в разложении. В работе построено многопараметрическое представление поля напряжений вблизи каждой из вершин трещин, в котором удерживаются высшие приближения. Представлен метод вычисления коэффициентов асимптотического разложения М. Уильямса (амплитудных, масштабных множителей), базирующийся на классическом комплексном представлении решения Колосова – Мусхелишвили и его разложении в ряд в окрестности вершины трещины. Найдены аналитические зависимости коэффициентов полного асимптотического разложения М. Уильямса (Т-напряжений и коэффициентов высших приближений) от приложенной нагрузки и геометрических параметров образца. Показано, что в полном асимптотическом разложении компонент тензора напряжений в окрестности вершины трещины необходимо удерживать помимо главных членов асимптотического разложения и Т-напряжений следующие слагаемые (до пяти слагаемых). В работе построено полное асимптотическое разложение компонент тензора напряжений у вершин двух трещин в бесконечной пластине с двумя коллинеарными трещинами конечной длины, в котором можно удержать любое наперед заданное число слагаемых.

В работе получены аналитические выражения для амплитудных коэффициентов полного асимптотического разложения поля напряжений у вершин двух коллинеарных трещин конечной длины в бесконечной пластине, находящейся в условиях 1) чистого растяжения; 2) чистого поперечного сдвига; 3) смешанного нагружения. Показано, что наряду с главным членом асимптотического разложения и Т-напряжением высшие приближения в полном асимптотическом разложении являются важными параметрами механики разрушения, учет которых необходим для оценки полей напряжений в окрестности вершины дефекта, и, следовательно, для более точной оценки несущей способности и долговечности образца. Аналитические выражения коэффициентов асимптотического разложения поля напряжений для любого наперед заданного числа удерживаемых слагаемых доступны лишь для пластины с одной трещиной конечной длины, поэтому важно расширить класс образцов, для которых имеются аналитические зависимости амплитудных множителей от приложенной нагрузки и геометрических параметров образца. Полученное в работе асимптотическое решение для бесконечной пластины с двумя трещинами равной длины может быть использовано для 1) проверки численной обработки экспериментальных данных, полученных с помощью поляризационно-оптических методов механики деформируемого твердого тела для образцов с трещинами; 2) проверки численных алгоритмов, активно разрабатываемых в настоящее время для вычисления амплитудных коэффициентов многопараметрического поля напряжений.

С помощью поляризационно-оптических методов (метода фотоупругости) и МКЭ анализа определены коэффициенты полного асимптотического разложения М. Уильямса поля напряжений у вершины трещины в линейно упругом изотропном материале для большой серии экспериментальных образцов с трещинами и надрезами. Предложен новый образец для определения параметров механики разрушения: полудиск с краевым надрезом для испытаний на сжатие с постоянным значением функцией формы. Выполнена цифровая обработка экспериментальных данных. Для проверки результатов обработки эксперимента в CAE системе SIMULIA Abaqus проведены МКЭ расчеты для серии экспериментальных образцов с трещинами и надрезами. Представлен комплекс программ, реализующих быструю обработку экспериментальной информации.

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ГРАДИЕНТНЫХ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЯХ

Пугачева Н.Б., Быкова Т.М

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

В настоящее время накоплен большой опыт по нанесению и эксплуатации диффузионных боридных покрытий, которые весьма эффективны для поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента, работающих в условиях трения без смазки или в коррозионных средах, а также при абразивном изнашивании. Интерес представляют исследования влияния химического состава стали-основы на изменения структуры, химического состава и характера разрушения боридных покрытий в условиях резкого изменения температур и при износе.

Диффузионные боридные покрытия наносили на образцы стали Ст3 и 4Х5МФС в порошковых насыщающих смесях на основе карбида бора. При диффузионном борировании сталей формируются градиентные покрытия, состоящие из трех последовательно расположенных слоев, отличающихся друг от друга химическим и фазовым составами и свойствами, которые определяются химическим составом стали-основы. Схематично строение градиентных боридных покрытий изображено на рисунке 1.

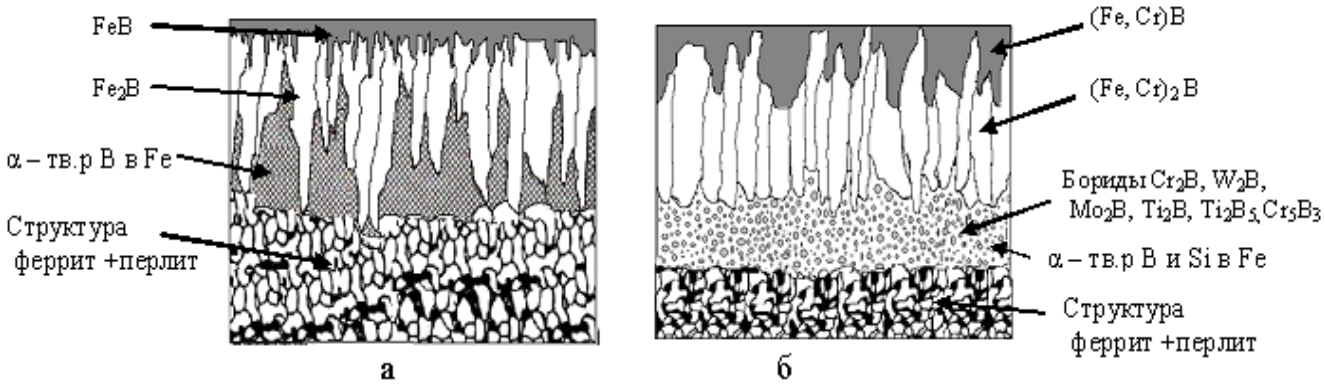


Рис. 1. Схема градиентных боридных покрытий: а – на стали марки Ст3; б – на стали 4Х5МФС

Для оценки стойкости боридных покрытий к растрескиванию проведены испытания, позволяющие осуществлять циклический нагрев образцов до заданной температуры в условиях постоянно действующих механических нагрузок. Режим термоциклирования – нагрев до 1000, 1100 и 1200 °С в атмосферах воздуха, азота и водорода на сталях марки Ст3 и 4Х5МФС.

Разрушение боридных покрытий при термоциклировании определяются стойкостью стали к высокотемпературному окислению и типом образующегося оксида. Бориды железа в покрытии обладают достаточно высокой жаростойкостью, но игольчатое строение их зерен позволяет кислороду проникать на границу «сталь – покрытие», где в случае углеродистой стали образуются рыхлые объемные оксиды Fe_2O_3, выталкивающие иглы боридов в покрытии, или тонкие защитные пленки оксида Cr_2O_3 в случае сталей с содержанием хрома не менее 5 мас. %, не влияющие на разрушение покрытия.

При термоциклировании в восстановительной атмосфере (водорода) стойкость боридных покрытий к растрескиванию определяется характеристиками пластичности стали-основы. На пластичных сталях, таких как Ст3, разрушение покрытия происходит путем квазипериодического прерывистого растрескивания, переходящего в стохастически разветвленное при больших степенях деформации в области шейки (до 98 %). На малопластичных сталях, таких как сталь 4Х5МФС, разрушение покрытия носит характер квазипериодического растрескивания с образованием сплошных трещин по диаметру и вдоль образца (деформация в шейке 21 %).

Исследован характер разрушения диффузионных боридных покрытий в процессе фрикционных испытаний по схеме «вал – пластина» при нагрузках от 196 до 1274 Н. Деградация боридных покрытий при интенсивном трибологическом воздействии в условиях про-

веденных испытаний происходит не за счет микросколов, а путем пластической деформации, фрагментации зерен боридов железа и внедрением этих фрагментов под действием приложенных нагрузок в основу.

Полученные новые сведения о физико – механических свойствах боридов железа в составе диффузионных покрытий позволили расширить область их применения. Если ранее считалось, что диффузионное борирование целесообразно применять для штампового инструмента, эксплуатируемого в условиях трения при термоциклировании, то результаты исследования данной работы обосновывают возможность использования данного способа ХТО для эксплуатации при климатических температурах, например для режущего инструмента или штампов холодного деформирования.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ФАНО России по теме ГР № 01201375907.

УДК 621.787:539.319

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

Кирпичёв В.А., Сазанов В.П., Вакулюк В.С., Шадрин В.К.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), д. 34, Московское шоссе, г. Самара, 443086 Российская Федерация, e-mail: sopromat@ssau.ru

Для повышения сопротивления усталости деталей машин широкое применение на практике нашли различные методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД). Многочисленными исследованиями установлено, что основную роль в повышении характеристик сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей играют сжимающие остаточные напряжения.

Проведённые эксперименты [1] показывают, что наиболее точно связь между приращением предела выносливости упрочнённых деталей и остаточными напряжениями отражает критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, предложенный в работе [2], так как этот критерий учитывает влияние на сопротивление усталости не только величины, но и характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

Для вычисления приращения предела выносливости поверхностно упрочнённой детали с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ необходимо знать достаточно точное распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя, которое можно получить только на образцах, вырезанных из обработанной ППД детали. Сохранить исследуемую деталь и получить распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя в любом её сечении позволяет расчётно-экспериментальный метод с использованием образцов-свидетелей и современных расчётных комплексов, причём при определении остаточных напряжений в этом случае разрушению подвергается только образец-свидетель. Образец-свидетель, имеющий определённые размеры и форму, проходит весь технологический цикл упрочняющей обработки вместе со штатной деталью.

В основе расчётно-экспериментального метода определения остаточных напряжений лежит известная гипотеза о том, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при ППД получают одинаковые первоначальные деформации. В исследовании были проанализированы результаты испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений нескольких партий цилиндрических образцов из сталей 20, 45, 40Х, 30ХГСА с наружным диаметром в гладкой части от 10 до 50 мм [1]. Все образцы перед испытаниями подвергались пневмо- и гидродробеструйной обработке стальной дробью. В качестве образца-свидетеля при проведении исследований вышеуказанных партий образцов использовалась втулка с наружным диаметром 51,5 мм и внутренним диаметром 45 мм.

При определении первоначальных деформаций в конечно-элементной модели образца-свидетеля в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя образца-свидетеля (втулки), полученное методом колец и полосок.

На основании проведённых исследований установлено:

– расчёт остаточных напряжений в образцах диаметром 10-50 мм из сталей 20, 45, 40Х, 30ХГСА после пневмо- и гидродробеструйной обработок по первоначальным деформациям образца-свидетеля показал, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями остаточных напряжений в гладких образцах не превышает 10%, в образцах с надрезами – 7%.

– использование рассчитанных по первоначальным деформациям образца-свидетеля остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости образцов в условиях концентрации напряжений с точностью до 11%.

– применение образцов-свидетелей позволяет назначать оптимальные по сопротивлению многоцикловой усталости режимы и методы поверхностного пластического деформирования деталей сложной формы без проведения испытаний на усталость натурных деталей.

Литература

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.

2. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29–32.

УДК 621.787:539.319

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ДЕТАЛЕЙ

Павлов В.Ф., Семёнова О.Ю., Вакулюк В.С., Сазанов В.П.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), д. 34, Московское шоссе, г. Самара, 443086 Российская Федерация, e-mail: sopromat@ssau.ru

Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей обычно используются два критерия. Первым критерием являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Для определения второго критерия в работе [1] использовалось решение задачи [2] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Второй критерий $\overline{\sigma}_{ост}$ – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений – влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённой детали был получен из решения [2]в виде

$$\overline{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi \text{ , (1)}$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения в опасном сечении детали, $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$, $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

Приращение предела выносливости $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$ упрочнённой детали с концентратором напряжений при использовании критерия $\overline{\sigma}_{ост}$ определяется по следующей формуле:

$$\Delta P_R = \overline{\psi}_P \cdot \left|\overline{\sigma}_{ост}\right| \text{ , (2)}$$

где $\overline{\psi}_P(\overline{\psi}_\sigma, \overline{\psi}_\tau)$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\overline{\sigma}_{ост}$.

В работе [3] было экспериментально установлено, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров опасного поперечного сечения и для цилиндрических деталей определяется соотношением

$$t_{кр} = 0{,}0216\, D \text{ , (3)}$$

где D – диаметр опасного сечения детали.

По результатам большого числа экспериментов, проведённых в НИЛ-31 и на кафедре сопротивления материалов СГАУ [3], установлено:

– при различных методах поверхностного упрочнения, степенях наклёпа, размерах и формах концентраторов, асимметриях цикла напряжений для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами обосновано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений, вычисляемых по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости;

– критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости в опасном сечении упрочнённых деталей с концентраторами напряжений определяется только размерами поперечного сечения и не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, последовательности изготовления и упрочнения концентратора, наклёпа, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации и асимметрии цикла напряжений.

– для исследованных видов поверхностного упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка, обкатка роликом, алмазное выглаживане, обработка микрошариками, азотирование, цементация, борирование), различных материалов (стали 30ХГСА, 12Х18Н10Т,

12Х18Н9, ЭИ961, ЭИ696, ВНС40, 16ХСН, ЭП479Ш, 38Х2МЮА, 40Х, 40ХН, 45, 40, 20; сплавы ЭИ437Б, ЭИ698ВД, ВКС-5, ВНС-17, ЭП718, ЖС6У, В93, В95, Д16Т, Д1П, 1953Т1, ВТ16, ВТ9, ВТ3-1), степеней равномерного и неравномерного наклёпа, величин (-29 – -2200 МПа) и характера распределения сжимающих остаточных напряжений, типов и размеров концентраторов, поперечных размеров деталей критерий среднеинтегральных остаточных напряжений хорошо отражает связь между остаточными напряжениями и приращением предела выносливости.

Литература

1. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29–32.

2. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.1. – С. 88–95.

3. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФРАГМЕНТАЦИИ И ДРОБЛЕНИЯ ЗЕРЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Волегов П.С., Тельканов М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: crocinc@mail.ru

При интенсивном деформировании металлических тел наблюдаются значительные изменения в структурах нижних масштабных уровней, в первую очередь на масштабах кристаллической решетки и кристаллита. Одними из наиболее важных процессов, возникающих при интенсивных неупругих деформациях поликристаллических материалов, являются формирование так называемой кристаллографической текстуры (появление выделенных направлений в ориентациях кристаллических решеток отдельных зерен), фрагментация (появление слабо разориентированных областей в масштабах одного кристаллита) и дробление зерен (образование новых зерен за счет появления большеугловых границ внутри существующих зерен поликристалла). Специально для описания процессов образования текстуры, а также фрагментации и дробления зерен, создаются математические модели, учитывающие механизмы поворотов (ротаций) кристаллических решёток материала при интенсивных неупругих деформациях.

В работе используется модель, основанная на двухуровневом подходе к рассмотрению неупругого деформирования поликристаллических металлов. В качестве элемента макроуровня используется представительный макрообъем поликристаллического материала, состоящий из элементов мезоуровня – отдельных кристаллитов. Определяющим соотношением мезо- и макроуровня является закон Гука, записанный в скоростной релаксационной форме. В качестве основного механизма неупругого деформирования элементов мезоуровня выступают сдвиги краевых дислокаций по кристаллографическим системам скольжения при достижении касательным напряжением некоторого критического значения. Скорости сдвигов описываются упруговязкопластическим соотношением Хатчинсона.

Используя кинематическую гипотезу Фойгта, тензоры скоростей деформаций всех зёрен принимаются равными тензору деформации скорости представительного объёма поликристалла. Прочие параметры мезоуровня усредняются по объёму и затем передаются на макроуровень. Для описания процессов ротаций решёток зёрен применена модель, в которой явным образом учитываются физические причины разворотов решёток зёрен. В этой модели развороты связаны с вращательным моментом, возникающим из-за появления на межзёренной границе дислокаций ориентационного несоответствия в результате перехода дислокаций из одного зерна в другое.

С использованием предложенной модели ротаций проведен численный эксперимент по равноканальному угловому прессованию (РКУП) поликристалла с параметрами, соответствующими технически чистой меди. При сравнении полюсных фигур, полученных с использованием предложенной модели ротаций, а также данные аналогичного натурного эксперимента, отчётливо прослеживается схожий характер неоднородностей на полученных полюсных фигурах.

Для описания процессов фрагментации зерен был поставлен численный эксперимент по одноосному растяжению поликристаллического агрегата из 512 элементов мезоуровня, объединенных в 64 «конгломерата» с одинаковыми ориентациями кристаллической решетки. Таким образом, каждому из конгломератов можно было поставить в соответствие отдельное зерно поликристалла, а элементу мезоуровня внутри конгломерата – фрагмент зерна. По образованию большеугловых границ между фрагментами можно судить о появлении новых зерен в процессе деформирования. Построены полюсные фигуры, характеризующие распределение ориентаций кристаллических решеток в процессе деформирования. При анализе ротаций решёток зёрен был сделан следующий вывод: количество зёрен, принимающих участие в ротациях, с увеличением накопленной деформации снижается, в то время как скорость вращения решёток постепенно увеличивается. С физической точки зрения это можно трактовать,

как сохранение некоторой эквивалентной мощности: некоторые зёрна в процессе разворотов занимают положение с наименьшей энергией и прекращают вращение, а полная подводимая энергия распределяется между остальными зёрнами.

К числу существенных недостатков другой часто используемой модели ротаций (т.н. модели стесненного поворота по Тейлору) относят отсутствие условия окончания поворотов, в то время как модель несовместности чётко определяет этот момент. Полученные траектории движения изображающих точек ротации (ИТР), позволяют говорить, что при использовании модели несовместности пластических сдвигов траектория ИТР заметно короче, а, следовательно, в определённый момент вращение решётки зерна прекращается.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4917.2015.1, РФФИ (грант №14-01-96008 р_урал_а).

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Тверяков А.М.[1], Штин А.С.[2]

Тюменский государственный нефтегазовый университет, д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000 Российская Федерация, e-mail: [1]tveryakov@mail.ru, [2]shtin92@mail.ru

Очень важным показателем эксплуатации режущего инструмента является работоспособность. На данный момент существующие способы определения температуры максимальной работоспособности обладают каждый своими недостатками.[1]

Одним из таких методов является метод определения температуры максимальной работоспособности сменных многогранных пластин (СМП) исследованием изменения электрической проводимости твердого сплава в зависимости от температуры.[2]

Определение осуществляется на специально разработанной установке патент РФ №133764.

Недостатками метода является невозможность жесткой фиксации положения жала газовой горелки, отсутствие гибкой настройки направления пламени, длительный нагрев СМП.

Для устранения выявленных недостатков была разработана установка для определения температуры максимальной работоспособности инструментального твердого сплава (ИТС). Определениетемпературы на предложенной установке Рис.1 производится следующим образом:

На изолятор 2,находящийся внутри столика 1, устанавливают СМП 3, которую закрепляют через две токоподводящих контакта 5, двух изолирующих пластин и компенсатор расширения металла, двумя зажимами 4. Затем подают питание 6, загорается лампочка индикатор 7. Регулировка направления пламени горелки осуществляется двумя способами по высоте с помощью ходового винта 9 и по углу наклона при помощи клипсы с шарниром 10, а пламя горелки регулируется с помощью винта отвечающего за регулировку поступления газа 11. В время нагрева нагревающим элементом 8 СМП 3, фиксируют изменения показаний вольтметра 12, амперметра 13 и термометра 14. [3]

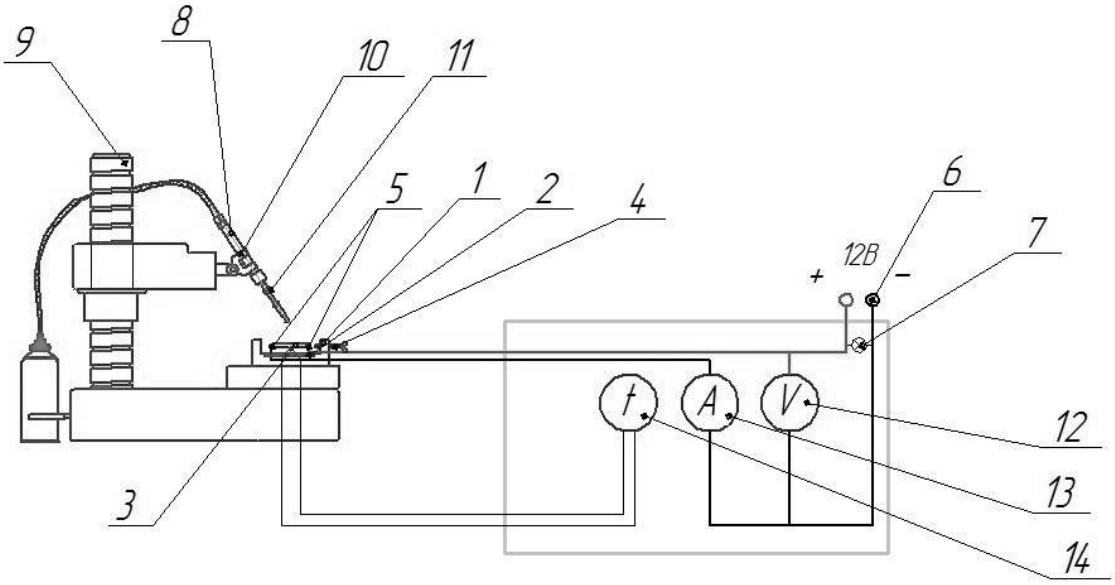


Рис.1. Установка для определения условий максимальной работоспособности инструментальных твердых сплавов

По результатам каждого проведенного опыта находим по формуле электрическуюпроводимость G(10^{-2}См) при разной величине температуры Θ(°C). Далее строим график зависимости температуры от электрической проводимости G=f(Θ). Структурно чувствительная характеристика материала СМП по результатам проведенных опытов находится, в интервале от 390 до 1100 °C. Проанализировав полученные данные, находим диапазон температур, в котором электрическая проводимость имеет минимальные значения (допускается

изменение в пределах 5 %). Принятая величина соответствует пятипроцентной погрешности измерений, приемлемый для инженерных расчетов. [4] Затем на графике через ординату, соответствующюрассчитанной величине G*(10^{-2}См), проводят прямую параллельную оси абсцисс до пересечения с линиями графика. Определяют абсциссы точек пересечения и принимают их за границы искомого интервала температур. Выявленный интервал температур принимают, как условия максимальной работоспособности режущих пластин из данного-твердого сплава Ѳмр(°С).

Таким образом, в предложенной установке решаются проблемы, выявленные во время проведения опытовна старой установке. Новая установка позволяет сократить время нагрева сменных многогранных пластин, делает установку более мобильной, более удобной, более эстетичной.

Литература

1. Артамонов, Е.В. Определение температуры максимальной работоспособности сменных режущих пластин из инструментальных твердых сплавов. / Е.В. Артамонов, Д.С. Василега, А.М. Тверяков // Омский научный вестник. Серия Приборы, машины и технологии.–2013.–№ 3 (123).–С. 56–58.– Библиогр.: с. 58.

2. Артамонов, Е.В. Определение температуры максимальной работоспособности твердосплавных режущих пластин. / Е.В. Артамонов, Д.С. Василега, А.М. Тверяков // СТИН. – 2013. - № 11. – С. 15–17.

3. Патент РФ №133764 МПК 7 B23B1/00. Установка для определения температуры максимальной работоспособности твердосплавных режущих пластин/ Е.В. Артамонов, Д.С. Василега, А.М. Тверяков, - Опубл. 27.10.2013

4. Ostapenko, M.S. Method of evaluation of quality of metal-cutting tool. / M.S. Ostapenko, D.S. Vasilega //Applied Mechanics and Materials. – 2013 – V. 379. – P. 49–55.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ПРОЦЕССАХ ОМД

Баранов Г.Л.

Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация, e-mail: bargeleo@mail.ru

Величина и характер приложения технологических нагрузок к исполнительным органам машин для обработки металлов давлением, а также качество получаемых изделий в значительной степени определяются распределением напряжений на контактной поверхности очага деформации. Экспериментально установлено, что во многих процессах ОМД на этой поверхности имеются участки скольжения, в пределах которых контактные напряжения подчиняются закону трения Кулона. Существующие зависимости для определения контактных напряжений на этих участках найдены с использованием приближенного условия пластичности, записанного в главных напряжениях [1]. До последнего времени в литературе отсутствовала оценка погрешности указанного приближения.

Целью работы являлось получение замкнутых аналитических решений для контактных напряжений, подчиняющихся закону трения Кулона, при обработке идеального жесткопластического материала в условиях плоской деформации с применением точного условия пластичности Мизеса.

Установлено, что в прямоугольной системе координат при линейном распределении касательных напряжений по толщине полосы распределение нормальных напряжений p на контактной поверхности задается выражением [2]

$$(\ln pf)/f + 2\arcsin(pf) = x/h + C_1, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения, x – координата контактной поверхности, h – половина толщины полосы, C_1 – произвольная постоянная, определяемая из граничных условий.

В случае цилиндрической системы координат при пластическом течении материала в клиновой полости с центральным углом 2α указанное распределение имеет следующий вид [3,4]

$$\ln (h/h_i) = (a_{1i} \ln |g_i\, pf + 2\alpha\sqrt{1-(pf)^2}\,| + a_{2i} \arcsin(pf) + C_{1i})/\delta, \quad (2)$$

где индекс i может принимать одно из двух значений: i=1 для тонкого конца клина, i=2 – для толстого конца клина; g_i – коэффициент, учитывающий направление течения материала, g_1=1, g_2= -1, h – текущая высота полосы; h_i – высота торца, на котором заданы граничные условия; $\delta=f/\alpha$; $a_{1i} =(g_i - 4 f \alpha)/(1+4\alpha^2)$; $a_{2i} =2(f g_i + \alpha)/(1+4\alpha^2)$; C_{1i} – произвольные постоянные, определяемые граничными условиями на торцах.

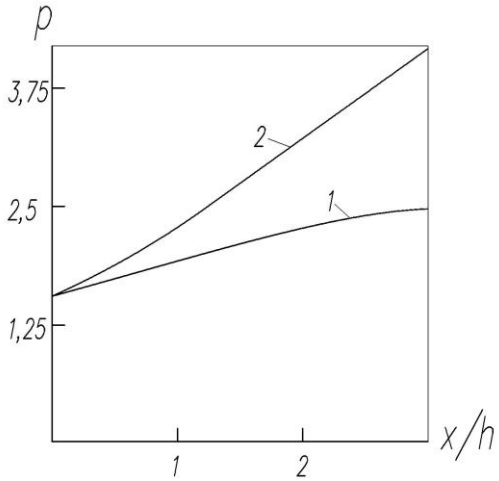


Рис. Эпюры нормальных контактных напряжений при осадке полосы

Учитывая, что максимальные касательные контактные напряжения не могут превышать величину предела текучести при чистом сдвиге, из формул (1) и (2) получили зависимости для определения длины участка скольжения при осадке прямоугольной полосы L_c/ h =

π - C_1 и клиновидной заготовки $L_{ci}/h_i = 0{,}5\ (\lambda_i - 1)\ \mathrm{ctg}\alpha$, где $\lambda_i = \exp[(0{,}5\pi\ a_{2i} + C_{1i})/\delta]$. В работе выполнен анализ полученных решений и их сопоставление с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Основные результаты исследования

Принципиальной особенностью полученных решений является то, что при использований закона Кулона на границе участков скольжения и торможения производная *dp/dx* обращается в нуль. Как следует из сопоставления эпюр нормальных контактных напряжений на участке скольжения при осадке прямоугольной полосы, полученных при f=0,4 и L_c/h=3 по формуле (1) (кривая 1 на рис.) и с использованием инженерного метода [1] (кривая 2 на рис.), замена точного условия пластичности приближенным приводит к уменьшению в 2-3 раза расчетной длины участка скольжения и увеличению среднего нормального напряжения на 20-30%. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании методики расчета технологических нагрузок для процессов ОМД, в которых имеются участки скольжения на контактной поверхности очага деформации.

Литература

1. *Унксов Е. П.* Инженерная теория пластичности. — М., «Машгиз», 1959, – 328 с.
2. *Баранов Г.Л.* Определение контактных напряжений при осадке прямоугольной полосы. Известия ВУЗов. Цветная металлургия. 2015, № 4. С. 25–31.
3. *Баранов Г.Л.* Контактные напряжения при пластическом течении металла в клиновидном канале. Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2015, том 58, № 6. С. 429–433.
4. *Baranov G. L.* Improved Calculation of the Contact Stress in Strip Rolling. Steel in translation/ 2015, Volume 45, Issue 6, pp 447–452.

ВИХРЕТОКОВАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ СПЛАВОВ

Дмитриев С.Ф., Маликов В.Н., Сагалаков А.М., Давыдченко М.А., Ишков А.В.

ФГБОУ ВПО Алтайский государственный университет, д. 61, ул. Ленина, г. Барнаул,656049, Российская Федерация, e-mail: osys11@gmail.com

В современном машиностроении широко применяют дюралюминий и алюминиево-магниевые сплавы. Такие сплавы являются основными конструкционными материалами в авиации и космонавтике. В традиционных отраслях промышленности развитых стран, например, затраты на контроль качества составляют в среднем 1 – 3% стоимости выпускаемой продукции, а в таких отраслях промышленности, как оборонная, атомная, аэрокосмическая, затраты на контроль качества возрастают до 12 – 20%[1].

В этой связи актуальной задачей представляется разработка вихретоковых измерительных систем, предназначенных для локальных измерений электропроводности в неоднородных материалах, поиска дефектов в сплавах

Разработан сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь (ВТП) [1, 2] для локального контроля физических параметров при исследовании проводящих материалов. Достоинством данного преобразователя является возможность проводить локальные измерения на участках величиной порядка сотен микрометров и на глубинах порядка 5 мм. Катушки преобразователя размещены на сердечнике, изготовленном из пермаллоя 81НМА. Сердечник представляет собой четырехгранную пирамиду высотой 1 мм со стороной основания 0,2 мм. Измерительная обмотка расположена на острие пирамиды, что позволяет улучшить локализацию магнитного поля.

Измерительная система, построенная на основе миниатюрного вихретокового преобразователя, работает следующим образом. Программное обеспечение персонального компьютера формирует сигнал, направляемый на возбуждающую обмотку ВТП и принимает сигнал, поступающий с измерительной обмотки. Перед тем, как сигнал поступает в персональный компьютер, он подвергается аппаратной обработке с использованием системы полосовых фильтров и селективных усилителей. Благодаря одновременному управлению частотой генерируемого сигнала на возбуждающей катушке и частотой среза системы фильтрации, а также селективного усиления происходит выделение полезного сигнала, несущего информацию о возможных дефектах объекта контроля. Программное управление позволяет изменять рабочую частоту измерительной системы так, чтобы сигнал, получаемый с измерительной обмотки был надежно зарегистрирован.

Исследуемый образец представлял из себя пластину из сплава Al-Mg(Al-94 %, Mg-3%). Толщина пластины составляла 5.5 мм. Пластина имела шесть дефектов в виде прорезей шириной 0,25 мм, не доходивших до противоположной поверхности на 1, 2, 3, 4, 5 и 5,3 мм (рис. 1.).

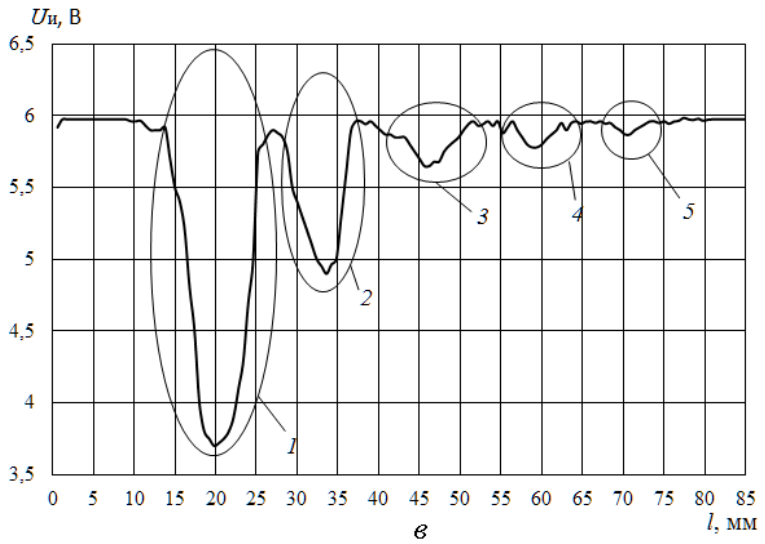


Рис. 1.

Результаты дефектоскопии при частоте ω = 500 Гц позволили обнаружить пять дефектов на глубине от бездефектной поверхности соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 мм. Уменьшение амплитуды выходного сигнала Uи на первом дефекте составило 2,5 В, на втором – 1 В, на третьем – 0,4 В, на четвертом – 0,2 В, на пятом – 0,1 В. Изменения отклика сигнала при прохождении над шестым дефектом не зафиксировано.

Таким образом, результаты эксперимента показали большие возможности метода вихревых токов при исследовании дефектов, скрытых в толще металла. Если ранее вихретоковый метод контроля можно было использовать для контроля только поверхностных дефектов (трещин, прорезей, нарушения сплошности поверхностного слоя металла), то применение сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей и специального программного обеспечения позволило локализовать магнитное поле на малом участке объекта контроля и добиться значительной глубины проникновения поля в глубину исследуемого объекта при подборе соответствующей частоты поля, создаваемого возбуждающей обмоткой.

Литература

1. Дмитриев С.Ф., А.М. Сагалаков, А.В. Ишков, Маликов В.Н. Сверхминиатюрные токовихревые преобразователи для исследования переходов металл–диэлектрик // Приборы и техника эксперимента, 2014. № 6. – С. 102–106

2. Дмитриев С.Ф., Катасонов А.О., Маликов В.Н.. А.М. Сагалаков // Дефектоскопия сплавов методом вихревых токов. Дефектоскопия. 2016. №1. С. 41–47.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЗЕРНОГРАНИЧНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Озерных В.С., Волегов П.С.

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

В настоящее время проблема прочности материалов является одной из наиболее актуальных; повышение прочностных характеристик материала позволяет использовать его при более высоких нагрузках. Границы диапазона предельных нагрузок, в котором может эксплуатироваться тот или иной материал, определяет величина предела текучести материала. Следовательно, необходимо разрабатывать такие способы повышения предела текучести материала, которые при этом не приводили бы к ухудшению других физико-механических свойств материала.

Под упрочнением на макроуровне понимается увеличение предела текучести материала, при этом основной физической причиной упрочнения является увеличение критических сдвиговых напряжений на системах скольжения дислокаций. Физические причины, приводящие к упрочнению на мезоуровне, связывают с взаимодействием дислокаций между собой, со скоплениями дислокаций; также существенное влияние на упрочнение оказывает наличие границ зерен в поликристаллическом агрегате. В связи с этим, возникает необходимость физически корректного описания различных эффектов, связанных с взаимодействием дислокаций между собой, а также границами зерен.

В работе используется двухуровневая математическая модель поликристалла, в которой элемент макроуровня представляет собой представительный объем поликристалла, состоящий из элементов мезоуровня – отдельных монокристаллических зерен.

Исследовано явление зернограничного упрочнения при переходе дислокаций из одного зерна в другое в поликристалле и двухфазном (ОЦК-ГЦК) бикристалле, характеристики фаз соответствуют дуплекс стали. Определены параметры, входящие в закон упрочнения, изучено влияние данных параметров на деформационное поведение материала. Проведено два эксперимента по простому сдвигу бикристалла, параметры модели в которых оставались неизменными, менялось только направление сдвига.

Выявлено, что в ОЦК-фазе упрочнение происходит менее интенсивно. Это можно объяснить тем, что поскольку в ОЦК-фазе общее число систем скольжения больше, чем в ГЦК-фазе, то и вариантов перехода дислокаций тоже больше; значит, медленнее меняются критические напряжения на данной системе скольжения, что и приводит к менее интенсивному упрочнению.

Проанализированы пары систем скольжения соседних зерен, из которых и в которые происходят переходы дислокаций. Выявлено, что наибольший вклад в упрочнение вносят те системы скольжения, мера разориентации которых наибольшая.

Соотношение активных систем скольжения при смене направления деформирования бикристалла на противоположное не изменилось: в ОЦК-фазе больше активных систем скольжения, чем в ГЦК-фазе, и упрочнение проходит менее интенсивно. Таким образом, можно ожидать, что при циклическом деформировании будет получена несимметричная кривая пластического гистерезиса. Иначе говоря, для такого бикристалла не выполняется гипотеза единой кривой, и становится принципиально важно учитывать не только величину внешнего воздействия, но и его направление.

Проведено исследование поведения ОЦК-поликристалла, состоящего из 1000 зерен, при неупругом деформировании. Использовались различные варианты меры разориентации системы скольжения данного зерна, соседнего зерна и границы. Мера разориентации определялась из условий минимума скорости приращения внутренней энергии соседних кристаллитов при переходе дислокаций через границу. Альтернативным вариантом являлось использование меры, учитывающей геометрические особенности взаимного расположения систем

скольжения соседних зерен. Определено, что выбор меры разориентации не оказывает существенного влияния на деформационное поведение материала.

Получены скорости изменения критических напряжений на активных системах скольжения в каждом зерне бикристалла и поликристалла. Выявлено, что чем меньше систем скольжения активны в данном кристалле, тем интенсивнее проходит в нем упрочнение. Одним из возможных механизмов снижения скорости увеличения критических напряжений на системах скольжения может стать механизм ротаций кристаллических решеток зерен при деформировании.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ №МК-4917.2015.1, РФФИ (грант №14-01-96008 р_урал_а).

КОНТАКТНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СОПРЯЖЕНИЯХ КОНУСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРЕДЕЛАХ ТРЕНИЯ ПОКОЯ

Феропонтов В.А., Перфильева Н.В., Максименко А.А., Котенева Н.В.

Алтайский Государственный Технический Университет им. И.И. Ползунова, д. 46, пр. Ленина, г. Барнаул, 656038, Российскаяч Федерация, e-mail: sopromat116@mail.ru

Современное оборудование очень разнообразно и состоит из большого количества сопряжений. В условиях резко возрастающих скоростей и производительности, остро встает проблема повышения прочности и долговечности машин, а также снижения материалоемкости. Все это необходимо для повышения конкурентоспособности.

Конусные соединения активно применяют в соединениях водогазопроводных труб, используются в зубной имплантационной системы ANKYLOS. Данное соединение обеспечивает динамическое самостабилизирующее смыкание соединяющихся поверхностей. Однако основное применение конусных соединений – это соединение деталей машин. Крутящий момент и осевые силы – самые распространенны е нагрузки, действующие на конусное соединение. Величина натяга при сборке должна обеспечивать плотность стыка, при этом она зависит не только от внешней нагрузки, но и от внутренних параметров соединения.

Применяемые на практике инженерные расчеты без учета контактных взаимодействий на прочность, основанные на определении номинальных и местных напряжений, уже являются недостаточными в современных условиях эксплуатации

Цель работы заключается в разработке уточненного метода расчета на прочность и жесткость конусных соединений с учетом перемещений в контакте до трения скольжения.

Вследствие перемещений в сопряжениях элементов конструкций передача давлений происходить по весьма малым площадкам. Материал вблизи такой площадки, не имея возможности свободно деформироваться, испытывает объемное напряженное состояние. Исследование контактных напряжений и перемещений необходимо для решения вопросов прочности многих ответственных соединений. К таким, так называемым, условно неподвижным соединениям относятся: резьбовые, клиновые, заклепочные, шлицевые соединения, соединения с натягом. Прочность и жесткость таких соединений во многом зависит от процессов, происходящих в контакте деталей соединений. Установлено, что на долю контактной деформации приходится до 80% от общей деформации [1]. Поэтому вопросы, связанные с контактным взаимодействием деталей, прежде всего, динамической контактной жесткостью и диссипацией энергии, являются весьма важными. Следовательно, классический инженерный расчет на прочность должен дополняться расчетом контактных смещений.

Теоретический расчет в статике с учетом контактных смещений в сопряжениях уже давно применяется на практике, однако до недавнего времени установки для практического измерения перемещений в контакте были ограничены по точности.

Проведем сравнение инженерного расчета и расчета с учетом контактных деформаций на примере конусного соединения.

Возникший в соединении диаметральный натяг зависит от радиальной жесткости вала и ступицы и определяется по формуле Ламе

$$\Delta = 10^3 \cdot k \cdot d_{cp} \cdot \theta \text{, (1)}$$

где k — осевая сила, необходимая для создания давления;

θ – коэффициент, учитывающий модуль нормальной упругости, коэффициент Пуассона и тонкостенность.

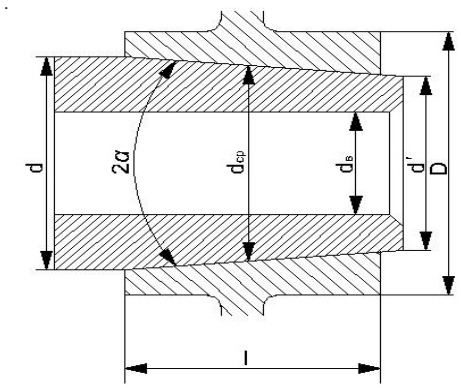


Рис. 1. Схема конусного соединения

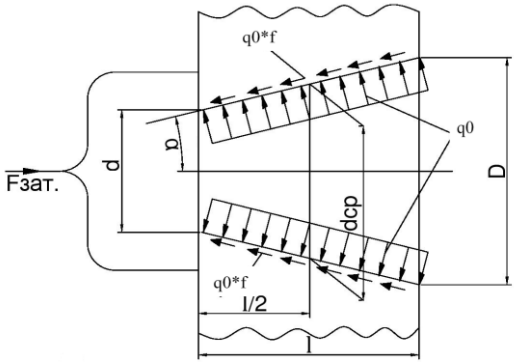


Рис. 2. Силы, действующие в конусном соединении

Необходимый осевой натяг определяется

$$h = 10^{-3}\frac{\Delta'}{K}, \quad (2)$$

где Δ' – коэффициент, зависящий от диаметрального натяга и параметров микрогеометрии; К – конусность.

С учетом контактных смещений фактический натяг определяется

$$\delta_f = \theta_{0f} \cdot d_{cp} \cdot \left(\frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2}\right), \quad (3)$$

где θ_{0f} – номинальное давление, рассчитанное с учетом контактной податливости.

Расчет показал, что при учете деформаций в контакте диаметральный и осевой натяг примерно на 30 % меньше, чем при обычном инженерном расчете [2].

Приведенная расчетная методика требует экспериментальной проверки.

Для этих целей можно применить лазерные измерительные технологии. Например, методы голографической интерферометрии.

Соотношение расчетных и экспериментальных данных зависимости осевого натяга от конусности. Разница между расчетными и экспериментальными данными не превышает 1%.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования характеристик контакта реальных конусных соединений позволяет сказать о правильности выбора теоретических предпосылок, динамической модели упругого контактного взаимодействия в пределах предварительного смещения, а также о необходимости использования в уточненных инженерных расчетах на прочность и жесткость соединений разработанной методики.

Литература

1. Иванов, С.А. Учет контактной жесткости при расчете неподвижных соединений [Текст] / А.С.Иванов // Вестник машиностроения. – 2005. – №3. – с. 46–48.

2. Феропонтов В.А., Максименко А.А., Перфильева Н.В. Контактные перемещения в сопряжениях конусных соединений в пределах трения покоя [Текст] /В.А.Феропонтов. // «Урал – Трибо» Материалы международной научно – технической конференции ученых, ведущих специалистов в области трибологии и аспирантов. Челябинск: Изд-во ЮурГУ 2014. С.7–10

КОНТАКТНАЯ ЖЕСТКОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Котенева Н.В., Максименко А.А., Перфильева Н.В., Феропонтов В.А., Борисова А.Д.

Алтайский Государственный Технический Университет им. И.И. Ползунова, д. 46, пр. Ленина, г. Барнаул, 656038, Российскаяч Федерация, e-mail: kot178@yandex.ru

Рассмотрено влияние контактной жесткости стыка в условиях динамического нагружения применительно к резьбовым соединениям деталей машин. Излагаемое ниже решение получено при следующих условиях:

- общая деформация деталей соединения является чисто упругой;
- местная деформация в зонах фактического контакта сопряженных поверхностей является в общем случае упругопластической;
- плотность распределения выступов достаточно велика, а вершины выступов различных уровней статически равномерно распределены по контактирующим поверхностям;
- витки резьбы, благодаря малому углу подъема, имеют кольцевую форму, поэтому можно считать стыковые поверхности резьбового соединения плоскими;
- взаимное влияние выступов отсутствует;
- шероховатая поверхность образована одним из характерных для деталей соединения видов механической обработки: точением, шлифованием, растачиванием;
- волнистостью поверхности гайки и сопрягаемой детали пренебрегаем:
- твердость одного из взаимодействующих тел (либо гайка, либо соединяемая деталь) выше;
- поверхность более твердого тела имеет сферическую модель микронеровности.

Резьбовые соединения относятся к наиболее распространенным в машиностроении видам разъемных соединений. Усилие затяжки, которое выбирается из условия обеспечения необходимой плотности стыка, зависит от приложенных к стыку внешних сил.

В течение эксплуатации усилие затяжки может самопроизвольно снижаться. Основными причинами, вызывающими его ослабление, являются: объемные пластические деформации в соединении, самопроизвольное увеличение пластических микроконтактных деформаций на торце гайки (винта) и в витках резьбы и самоотвинчивание гаек в условиях вибрационных нагрузок.

После раскрытия стыка внешняя нагрузка полностью передается на болт. Такое состояние соединения опасно для прочности болта и, как правило, недопустимо на практике с точки зрения разгерметизации стыка. Поэтому усилие затяжки следует назначать таким, чтобы при заданной внешней силе F стык оставался плотным [1].

В работе [2] показано, что податливость отдельных элементов резьбового соединения с учетом контактных деформаций может быть определена по формулам

$$\lambda_б = \frac{l_б}{E_б A_б} + \lambda_р + \lambda_{г.б} + k; \; \lambda_д = \frac{\ell_д}{E_д A_д} + k, \quad (1)$$

где $l_б$ - расчетная длина болта; $A_б$ - площадь поперечного сечения болта; $E_б$ - модуль упругости материала болта; $\lambda_р$ - податливость резьбы [1]; $\lambda_{г.б}$ - податливость головки болта [1]; $\ell_д$ - суммарная толщина соединяемых деталей; $E_д$ - модуль упругости материала деталей; $A_д$ - площадь условного цилиндра; k - контактная податливость резьбового соединения в нормальном направлении.

Для определения величины k в условиях статики с учетом упругопластических деформаций можно воспользоваться формулой

$$k = \frac{h}{F}, \quad (2)$$

где F - нормальное усилие; h - статическое упругопластическое сближение, определяемое по формуле:

$$h = \frac{R_{\max} F^{\frac{1}{\nu}}}{\left(A_a b H\right)^{\frac{1}{\nu}} k_y^{\frac{1}{\nu-1}}}, \quad (3)$$

где A_a - номинальная площадь контакта; b, ν - параметры кривой опорной шероховатой поверхности; H - предельная твердость; R_{max} - наибольшая высота неровностей профиля; k_y - коэффициент, зависящий от ν

В условиях вибрационного воздействия контактную податливость можно рассчитать по формуле

$$k = \frac{x(t)}{F^*}, \quad (4)$$

где $x(t)$ динамическое сближение, определяемое по формуле $x_{\max} = \left[\frac{(\nu+1)}{2\lambda}\left(v_0^2 + \frac{2\lambda h^{\nu+1}}{\nu+1}\right)\right]^{1/\nu+1}$; v_0 - начальная скорость нагружения, которая задается одиночным ударным импульсом с последующим затуханием процесса; $\lambda = \frac{a}{m}$; $a = \frac{b H A_a k_y^{\frac{\nu}{\nu-1}}}{R_{\max}^{\nu}}$; m - масса тела; F^* - нормальное усилие, являющееся в случае динамического нагружения нормально поджатого контакта в каждый момент времени суммой нормальной статической составляющей и динамической силы, изменяющейся во времени.

Предложенный метод расчета контактной жесткости резьбового соединения позволяет учесть влияние физико-механических свойств материалов деталей, их геометрических размеров, параметров микрогеометрии сопрягаемых поверхностей, а также условий нагружения.

Литература

1. Биргер И.А. Резьбовые соединения / И.А. Биргер, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1973. – 256 с.

2. Котенева, Н.В. Упругопластический динамический контакт твердых тел: монография / Н. В. Котенева. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. – 127с.

АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

Коробов Ю.С.[1], Белоцерковский М.А.[2], Тимофеев К.М.[1], Thomas S.[3]

[1] *УрФУ, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация e-mail: yukorobov@gmail.com*
[2] *ОИМ НАН Беларуси, д. 12, ул. Академическая, г. Минск, 220072, Республика Беларусь*
[3] *Mahatma Gandhi University, P.D Hills P.O, Kottayam, Kerala, 686560, India*

Газопламенным напылением полимеров можно получать функциональные покрытия для защиты от износа и коррозии. Добавление в исходный порошковый полимерный материал различных наполнителей позволяет целенаправленно изменять свойства получаемых покрытий. Надежность покрытий в значительной степени определяется его адгезионной прочностью. Целью работы является изучение влияния характеристик исходных полимеров, доли неорганических наполнителей и технологических параметров напыления на адгезионную прочность покрытий применительно к газопламенному напылению полимеров.

Для нанесения покрытий использован пистолет газопламенного напыления ТЕРКО-П, рис. 1. В его конструкции реализован эффект эжектирования (газодинамической активации), возникающий при изменении соотношения скоростей выхода компонентов горючей смеси распыляющем сопле и воздуха в спутном потоке, движущемся в зазоре между мундштуком и сопловым наконечником. Поток воздуха является газодинамическим активатором, с помощью которого изменяется форма факела и появляется возможность регулировать условия теплообмена между факелом и порошком. Использование этого эффекта позволило наносить покрытия из порошков термопластов с температурой плавления 360 – 650 К при производительности до 2,9 кг/ч без деструкции полимеров.

а)

б)

Рис. 1. Пистолет газопламенного напыления Терко-П, а – общий вид, б – в работе

По методике отрыва конического штифта выполнено определение адгезионной прочности полимерных покрытий, полученных газопламеным напылением, при изменении следующих параметров:

- вид полимера: полиамид, полиэтилен низкого давления, полиэтилен высокого давления низкой плотности, полиэтилентерефталат;
- вид и доля неорганических наполнителей: ситалл и алюминиевая пудра;
- фракция полимерных порошков;
- состав пропано-воздушной смеси, используемой в качестве источника нагрева: окислительный, нейтральный, восстановительный.

В результате исследований установлено:

- при нанесении различных полимерных покрытий наибольшая адгезия достигается напылением порошков с размерами частиц от 150 до 300 мкм, причем максимальная проч-

ность сцепления покрытий с основой наблюдается при соблюдении следующего соотношения между минимальным и максимальным диаметром частиц в шихте: $d_{max}/d_{min} < (1,8–2,0)$;

- введение неорганических наполнителей в состав напыляемой шихты позволяет увеличивать адгезию полимерных покрытий к стали на 15–20%, при этом величина критического содержания наполнителя при превышении которой наблюдается уменьшение адгезионной прочности, составляет 15 об. %;

- напыление предварительного слоя, обеспечивающего адгезию покрытия, необходимо осуществлять порошком с размером частиц менее 60 мкм в окислительном пламени (при соотношении воздуха и пропана в смеси от 24/1 до 32/1), напыление основного покрытия необходимо осуществлять порошком с размером частиц 100–300 мкм в нормальном пламени (при соотношении воздуха и пропана в смеси от 20/1 до 24/1), а оплавление покрытия производить при соотношении воздуха и пропана в смеси от 16/1 до 20/1.

ВЛИЯНИЕ МОЛИБДЕНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Корешкова Е.В., Кулемина А.А.

ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация, e-mail: elenavk0276@mail.ru, newalena@mail.ru

Современные технологии получения, обработки и испытания материалов с целью повышения уровня функциональных свойств, долговечности и надежности деталей машин и элементов конструкций, работающих в сложных условиях эксплуатации усугубленных природно-климатическими факторами диктуют особые требования к функциональным материалам.

Электроосаждение сплавов на основе железа для восстановления и упрочнения элементов конструкций и деталей машин может быть весьма эффективно. В свете последних тенденций развития гальванотехники особый интерес представляют сплавы электрохимической природ, имеющие предрасположенность к образованию аморфной структуры. Формирование подобных структур может быть связано с введением в сплав элементов, приводящих к диспергированию зерна и получению аморфной или аморфно-кристаллической структур, что существенно влияет на изменение свойств и эксплуатационных характеристик гальванопокрытий.

Практическое применение электролитических сплавов такого рода требует чётких представлений о структурных особенностях легированных сплавов с аморфным строением. Получаемые при этом свойства непосредственно зависят от условий электролиза и могут варьироваться изменением параметров электроосаждения, таких как концентрация, плотность тока осаждения и температура электролита.

Целью данной работы является установление влияния молибдена, как элемента-аморфизатора, на получение электроосажденных сплавов на основе железа с различными типами структур и эксплуатационными характеристиками.

В процессе работы были получены следующие результаты:

1 Установлено влияние содержания элемента-аморфизатора на изменение структуры и фазового состояния электролитических сплавов на основе железа.

2 При концентрации молибдена в покрытиях до 17 % фиксируется кристаллическая структура, от 18 – 21 % молибдена протекает формирование аморфно-кристаллической структуры, и при достижении концентрации более 22 % – аморфная структура.

3 Выявлено, что рост содержания молибдена приводит к увеличению кристаллографической разориентировки большеугловых границ зерен и снижению совершенства текстуры.

3 Проведен комплекс испытаний по определению механических и эксплуатационных свойств электроосажденных покрытий на основе железа.

Проведя анализ полученных результатов по итогам работы можно сделать следующие выводы:

1 Увеличение концентрации молибдена в электролитических сплавах на основе железа приводит к изменению фазового состояния образующихся покрытий в такой последовательности: кристаллическое – аморфно-кристаллическое – аморфное.

2 Диспергирование структуры основного элемента сплавов осуществляется за счет повышения концентрации молибдена, являющегося аморфизатором, что приводит к переходу структуры от кристаллического к аморфному состоянию в сплавах Fe-Mo.

3 С ростом содержания элемента-аморфизатора в кристаллических покрытиях наблюдается повышение прочностных характеристик, связанное с диспергированием структуры, в аморфных — снижение скорости коррозии, в связи с отсутствием дефектов структуры (активных центров коррозии) и преобладания внутренних напряжений сжатия, замедляющих процесс коррозии.

Литература

1. Поветкин, В.В., Электролитическое легирование железа фосфором и молибденом / Поветкин В.В., Ковенский И.М., Корешкова Е.В., Неупокоева А.А., Золотарева Е.В. – М.: Известия вузов. Машиностроение. – № 4. – 2008. – С. 55-58.

2. Ковенский, И.М. Структура и свойства электролитических покрытий Fe-P и Fe-Mo / Ковенский И.М., Поветкин В.В., Корешкова Е.В. – Металловедение и термическая обработка металлов. Москва: изд-во «Высшая школа» - № 10. – 2009. – С. 46–48.

3. Кубашевски, О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа / М.: Металлургия, 1985. 184 с.

4. Гальванотехника: Справочник / Под ред. А.М. Гринберга. М.: Металлургия, 1987. 736 с.

5. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т.I Под общ. ред. акад. РАН Н.П. Лякишева. М: Машиностроение. 1996. 992 с.

ВЗАИМОСВЯЗЬ СУБШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ЗЕРНИСТОСТЬЮ МАТЕРИАЛА МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ И КАЧЕСТВОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Суслов А.Г. [1], Шалыгин М.Г. [2]

[1] *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, д. 5, ул. 2-я Бауманская, г. Москва, 105005, Российская Федерация, e-mail: mootechmash@mail.ru*

[2] *Брянский государственный технический университет, д. 7, б-р 50-лет Октября, г. Брянск, 241035, Российская Федерация, e-mail: migshalygin@yandex.ru*

Эксплуатационные свойства деталей машин в значительной степени зависят от геометрии их поверхностного слоя. Совокупности элементарных ячеек кристаллической решетки формируют зерна металлов, которые влияют на его физико-механические свойства при эксплуатации. Отсутствие комплексного исследования взаимосвязи субшероховатости с зернистостью и шероховатостью поверхности деталей машин не позволяет в большей степени проработать вопрос влияния субшероховатости поверхности на эксплуатационные характеристики деталей. Таким образом, *целью исследования* является определение взаимосвязи субшероховатости с качеством механической обработки и зернистостью материала.

В качестве объекта исследований выбраны плоские образцы, изготовленные из сталей 45 и 40х13, закаленных до мартенситной структуры (HRC 43…48, HRC 48…52), с механической обработкой до Ra 0,2 0,6, 1,5.

На каждой поверхности снимались профили субшероховатости в 8 сечениях на базовой длине *l=800* нм. Шаг субшероховатости по средней линии S_{mc} составил для сталей 45 и 40х13 соответственно 31,72 нм. и 21,92 нм. Средний размер зерна $L_з$ стали 45 составил 33,06 нм., стали 40х13 – 44,72 нм. При сопоставлении изображения структуры и профиля поверхности замечено, что изображению отдельно взятого зерна соответствует несколько выступов и впадин профиля субшероховатости. Это позволяет предположить, то впадины/выступы субшероховатости в границах сечения одного зерна являются точечными или линейными дефектами кристаллической решетки. В связи с тем, что структура материалов неоднородна определение зернистости только по среднему значению не дает полной картины о структуре материала. В этой связи, наиболее оптимальным является исследование взаимосвязи субшероховатости поверхности и зернистости материалов, основанное на анализе корреляционной связи шагов субшероховатости и линейных размеров зерна, полученных в одном сечении.

В процессе проведения исследований были получены следующие *результаты*. С целью проверки гипотезы о наличии функциональной корреляции между исследуемыми параметрами был проведен регрессионный анализ и определен индекс корреляции. При проведении регрессионного анализа исследовалась только зависимость субшероховатости от зерна, так как известно, а также согласно полученным результатам, шаг субшероховатости не может превысить размер зерна и, следовательно, можно придти к заключению, что зерно не зависит от субшероховатости. Обработка полученных данных методами регрессионного анализа позволила выявить уравнения связи. Анализ уравнений показывает экспоненциальную зависимость зерна материала от субшероховатости поверхности, соответственно, величина размера зерна и скорость роста функции зерна прямо пропорциональны.

С целью анализа взаимосвязи субшероховатости и вида обработки полученные значения в различных сечениях были усреднены. Согласно полученным данным относительная разность значений параметров Rz_c (Ra0,2 – 31,72 нм; Ra0,4 – 32,12 нм; Ra1,5 – 32,90 нм) и Sm_c (Ra0,2 – 35,47 нм; Ra0,4 – 34,00 нм; Ra1,5 – 31,45 нм) для каждого вида обработки не превышает 5%.

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие *выводы*.

Вид механической обработки влияет на полученную субшероховатость лишь незначительным смещением линейных дефектов при обработки и субшероховатостью обрабатывающего инструмента.

Проведенные регрессионный анализ позволяет с должностью степенью доверия говорить о наличии функциональной взаимосвязи между зернистостью и субшероховатостью поверхности.

Наличие на отдельно взятом зерне нескольких выступов/впадин субшероховатости можно объяснить наличием дефектов (дислокации, вакансии) кристаллической решетки зерна.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ РАСТРУБНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ТРУБ

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

ФГБУН ИПНГ СО РАН, д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677007, Российская Федерация,
e-mail: dhv4071@mail.ru

По действующим на сегодняшний день нормативным документам сварку в раструб, которая является наиболее надежным, простым и экономичным способом соединения полипропиленовых труб для водоснабжения, можно производить только при положительных температурах окружающего воздуха (ОВ) [1]. В Институте проблем нефти и газа СО РАН ведутся работы по разработке технологии сварки в раструб полипропиленовых труб, позволяющих расширить диапазон допустимых температур ОВ до -50 ºС. Для того, чтобы оценить надежность разработанной технологии сварки необходимо осуществить контроль качества получаемых сварных раструбных соединений.

Целью исследований является обоснование эффективности предложенной технологии сварки в раструб полипропиленовых труб при отрицательных температурах ОВ на основе результатов существующих и разработанного методов испытаний сварных раструбных соединений.

Для достижения цели исследований была произведена сварка в раструб полипропиленовых труб марки PPRC PN10 диаметром 63 мм при положительной (+ 23 ºС) и отрицательных (- 16 ºС, - 40 ºС) температурах ОВ. При температуре ОВ равной – 16 ºС сварка производилась как при положительных, т.е. здесь имеет место сварка с нарушением технологического режима. При температуре ОВ – 40 ºС сварка производилась с использованием предварительного подогрева. Продолжительности подогрева и свободного охлаждения для выравнивания температур свариваемых концов деталей в зависимости от температуры окружающего воздуха и температуры сменных насадок для подогрева для различных типоразмеров трубы рассчитывались с помощью программы PWH-Trumpet, изложенные в работе [2]. После операции остывания производилась стандартная сварка. Охлаждение сварного соединения после сварки производилось в теплоизоляционной камере. Полученные сварные соединения были подвергнуты стандартным испытаниям, существующим в нормативных документах, а именно на стойкость при постоянном внутреннем давлении, гидравлические испытания, на статический отдир, на сдвиг сжатием. При гидравлических испытаниях и на стойкость при постоянном внутреннем давлении все образцы сварных раструбных соединений оказались годными. При испытаниях на статический отдир 100 % образцов разрушались по основному материалу. Значения разрушающего напряжения сварных соединений, полученных при испытаниях на сдвиг сжатием варьировались от 15,33 МПа до 15,64 МПа. Так как стандартные испытания оказались малоинформативными и не выявили нарушения технологического режима сварки был разработан новый метод количественной оценки прочности при растяжении сварных раструбных соединений. На образцах сварных раструбных соединений наносятся надрезы, так чтобы площадь испытуемой области сварки была не больше, чем площадь минимального поперечного сечения образца. При стандартных кратковременных испытаниях на растяжение разрушение образца произойдет по сварному шву по заданной с помощью надрезов площади. По результатам механических испытаний на растяжение было выявлено, что разрушающее напряжение сварных раструбных соединений, произведенных при температуре -40 °С с предварительным подогревом и охлаждением в теплоизоляционной камере не уступает прочности сварных соединений, полученных стандартной сваркой при комнатной температуре.

Таким образом, показана эффективность разработанной технологии сварки в раструб полипропиленовых труб при отрицательных температурах ОВ на основе результатов испытаний по предложенной методике количественной оценки прочности по месту сплавления сварных раструбных соединений.

Литература

1. СП 40-101-96. Проектирование и монтаж трубопроводов из полипропилена «Рандом сополимер»; введ. 09.04.96.- Официальное издание, Минстрой России М.: ГУП ЦПП, 1997. – 14с.

2. Старостин Н.П., Аммосова О.А., Ботвин Г.В. Тепловой процесс сварки полипропиленовых труб в раструб при низких температурах // Сварка и диагностика. 2015. № 6. С. 57–61.

ПОЛИМОРФНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ ЖЕЛЕЗОМ И СПЛАВОМ FE-NI

Жихарева И.Г., Шмидт В.В., Смирнова Н.В., Воробьев О.А.

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: pavona81@rambler.ru

Введение. Большинство конструкционных материалов – это высоколегированные стали. Они обладают высокой твердостью, прочностью и другими эксплуатационными свойствами, но являются дорогостоящими. Перед учеными стоит задача разработать новый материал, не уступающий конструкционным сталям по этим свойствам, но более экономичный.

В Индии в Дели несколько сот лет стоят две цельные колонны из чистого железа (99,722%), отличающиеся необычной твердостью и неподверженные коррозии. Высказывается предположение, что это осколок метеорита, упавшего на Землю. Если эта точка зрения верна, то метеорит, скорее всего, образовался при очень высоких давлениях. В 1964г. T.Takahashi, W. Bassett методом ударной волны обнаружили новую фазу ε-Fe в лабораторных условиях, подвергая порошкообразное железо высоким давлениям (P=11,3 ГПа и T=293K). При этом наблюдался переход устойчивой фазы α-Fe (объемно-центрированная кубическая - ОЦК) в метастабильную фазу ε-Fe (гексагональная плотноупакованная - ГПУ), хотя при ступенчатом снятии давления эта фаза опять переходила в фазу α-Fe (при P≤3ГПа). Особенность гексагональной фазы ε-Fe – ее уникальные свойства. α-Fe – ферромагнитно, при высоких давлениях железо парамагнитно. Фаза ε-Fe немагнитна (магнитный момент равен нулю).

Цель работы: Направленное формирование экономичного покрытия железом и сплавом Fe-Ni с заданным фазовым составом (фаза ε-Fe).

Полученные результаты. Из водных растворов солей железа и никеля методом высокочастотного переменного тока при атмосферном давлении и комнатной температуре авторами было получено покрытие, содержащее гексагональную фазу ε-Fe.

Согласно проведенным нами теоретических расчетов по работе двумерного зародышеобразования фаза ε-Fe в самопроизвольных процессах существовать не может, т.к. $A_{\alpha\text{-Fe}} << A_{\varepsilon\text{-Fe}}$.

В то же время нами показано, что возможно текстурное соответствие (ТС) для двухфазного кобальта:

α-Co (ГПУ)	β-Co (ГЦК)
[0001]	[111]
$[10\bar{1}1]$	[100]
$[11\bar{2}0]$	[110]
$[10\bar{1}0]$	[112]

Подобные текстурные соответствия действительно существуют. При одинаковых значениях ретикулярных плотностей L_{hkl} для изоструктурных кристаллов ТС можно ожидать и для фаз различных металлов, например, α-Co и α-Fe или β-Co и α-Fe.

Поэтому можно было предположить, что такое текстурное соответствие возможно и для двухфазного железа: α-Fe и ε-Fe. Разница в энергии образования зародышей ОЦК-фазы и ГПУ-фазы железа мала и ее можно было бы считать равной нулю, если бы существовало взаимодействие только между первыми соседями. Однако за счет вторых, третьи и четвертых соседей коэффициенты при работе отрыва между первыми соседями для $в^{\alpha\text{-Fe}} \neq в^{\varepsilon\text{-Fe}}$.

Отсюда следует, что в данной двухфазной системе термодинамически устойчивой является только фаза α -Fe. Поскольку $\Psi_1^{\alpha}=\Psi_1^{\varepsilon}$ можно ожидать ТС в высокоретикулярных плотностях граней α-Fe и ε-Fe, но по мере понижения L_{hkl} все больший вклад будут вносить дальние соседи, значение работы разрыва связей которых различны для этих модификаций. Теоретические расчеты показали, что для железа возможны следующие ТС:

$$\frac{\alpha - Fe(ОЦК)}{(110)} \qquad \frac{\varepsilon - Fe\ (ГПУ)}{(10\bar{1}1)}$$

Гексагональная форма поликристалла подтверждена рентгенографическим методом и методом атомно-силовой микроскопии. Сравнение количества ε-фазы в чистом железе составляет 5-7%, а в сплаве Fe-Ni - 20-30%. Очевидно, никель, обладающий гранецентрирован-

ной кубической решеткой (ГЦКр), при осаждении облегчает перестройку валентных связей и углов при фазовом переходе α-Fe→ ε-Fe.

Выводы.

1. Показано, что наличие фазы ε-Fe в изучаемых покрытиях обеспечило повышение защитно-коррозионных свойств в 6,5 раз и микротвердости в 2 раза по сравнению с высоколегированными сталями 20Х23Н18, 08Х18Н10.

2. Показано, что для покрытий железом и сплавом Fe-Ni, осажденных из водных растворов солей при атмосферном давлении и комнатной температуре методом высокочастотного переменного тока, формирование фазы ε-Fe происходит в результате фазового перехода α-Fe→ ε-Fe.

3. Установлено, что этот переход происходит по ориентационному механизму (в результате удаления слабых крайних атомов железа в кристаллической решетке α-Fe и действия электромагнитных колебаний, разрыхляющих валентные связи).

4. Показано, что экономичность покрытий железом и сплавом Fe-Ni (ε-фаза) обеспечивается за счет долговечности эксплуатации (более 100 лет), при получении сокращения времени электролиза и концентрации электролитов на порядок, отсутствие нагревательных приборов и толщины покрытий (20-200 мкм вместо 2-10 мм).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕЙКИ И РАДИУСА ВОЛОКОН АРМИРОВАНИЯ НА ТЕКСТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

Шибаев В.А., Берестова С.А., Митюшов Е.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: shibaevv.a.1995@gmail.com, s.a.berestova@urfu.ru, mityushov-e@mail.ru

В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композита, не только определяемый исходными характеристики его компонентов, но и включающий свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. Направленный характер свойств – важнейшее достоинство композиционных материалов, позволяющее создавать элементы конструкций с заранее заданными свойствами, наиболее полно отвечающие характеру и условиям работы. Механические характеристики композиционных материалов, обусловливаемые схемой расположения волокон, могут изменяться в широких пределах. Кроме создания разнообразных геометрических форм изготовление конструкций из композиционных материалов предусматривает определение рациональной структуры материала, т.е. углов ориентации волокон, их числа и чередования, вида армирующих элементов, их относительного содержания в композиции и других параметров.

Наиболее широко распространены численные подходы к определению эффективных свойств композитов. И основным является метод конечных элементов, основанный на дискретизации сплошной среды. Для аналитического определения эффективных свойств композитного материала необходимо знать свойства волокон и матрицы, а также обладать информацией о текстурных параметрах, описывающих геометрию композита. Текстурные параметры возникают при осреднении свойств композиционного материала и зависят от сферических углов, задающих направления армирования, и от объемных долей волокон, соответствующих направлений.

В качестве модели композиционного материала рассмотрена ячеистая структура. Каждая ячейка является октаэдром. Волокна имеют цилиндрическую форму. Цель данной работы – исследование влияния геометрической формы ячейки и диаметра волокон армирования на текстурные параметры композитного материала.

Для построения математической модели структуры композиционного материала, основываясь на принципах симметрии, выделены ее части. Аналитически заданы уравнения плоскостей, ограничивающих объемы волокон. Произведено прямое интегрирование объемов, ограниченных этими плоскостями и поверхностями и получены объемные доли каждого из направлений армирования. Выделено шесть характерных направлений волокон в октаэдрической ячейке. Каждое направление задано сферическими углами. Вычислены текстурные параметры в материале с дискретным распределением волокон:

$$\Delta_1 = \Delta_2 = 16 * \frac{1}{V} * \left(V_n * \frac{a^2}{(2h^2+a^2)} + V_l\right),$$

$$\Delta_3 = 64 * \frac{1}{V} * V_n * \frac{h^2}{(2h^2+a^2)},$$

$$\Delta_4 = \Delta_5 = 8 * \frac{1}{V} * \left(V_n * \frac{a^4}{(4h^4+4a^2h^2+a^4)} + 2V_l\right),$$

$$\Delta_6 = 128 * \frac{1}{V} * V_n * \frac{h^4}{(4h^4+4a^2h^2+a^4)},$$

где V – суммарный объем всех направлений армирования,

V_n – объем волокон, направление которых совпадает с направлением наклонных ребер октаэдра,

V_l – объем волокон, направление которых совпадает с направлением ребер октаэдра, лежащих в его основании,

h - высота октаэдра,

a – ширина основания октаэдра.

Выявлены закономерности влияния высоты, ширины октаэдрической ячейки, а также диаметра волокон на текстурные параметры композиционного материала, что в свою очередь отражается на эффективных свойствах композита. При увеличении высоты ячейки вклад параметров с индексами 1,2, 4, и 5 становиться минимальным, а существенное влияние на эффективные свойства материала будет со стороны 3 и 6 текстурного параметра. При увеличении ширины ячейки параметр с индексом 6 практически стремиться к нулю. А вот диаметр волокна на текстурные параметры влияет не значительно. Вклад в эффективные свойства композиционного материала диаметр волокон вносит только при учете объемного содержания армирующих элементов.

В результате исследования были получены выражения, позволяющие при определенных значениях ширины и высоты октаэдрической ячейки, а также диаметра волокон получить значения текстурных параметров. Свойства волокон и матрицы, текстурные параметры, а также объемное содержание армирующих элементов дают информацию для определения эффективных упругих свойств композита, что позволяет предсказывать свойства композитного материала на стадии его проектирования.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАКРЫТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Еремин А.В.[1,2], Панин С.В.[1,2], Сундер Р. [2,3]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

[2] *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (НИ ТПУ), д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация*

[3] *Bangalore Integrated System Solutions (P) ltd., No.497E, 14th Cross, 4th Phase, Peenya Industrial Area, Bangalore – 58, Karnataka, India.*

e-mail: eremin_av@bk.ru, svp@ispms.ru, rs@biss.in

Поиск факторов, влияющих на процессы роста трещины при переменных нагрузках, начался ещё в начале XX века и продолжается в настоящее время. Современные модели роста трещины учитывают эффективный диапазон изменения коэффициента интенсивности напряжений, принимая во внимание закрытие трещины. Для корректного расчёта и прогнозирования необходимо экспериментально определить величину нагрузки, при которой происходит закрытие трещины. Результаты исследований по определению уровня закрытия трещины при помощи метода корреляции цифровых изображений при циклических испытаниях представлены в ряде недавно опубликованных работ [1-4]. При этом важной задачей по-прежнему остаётся исследование роста трещины, в основу которого лежит анализ поведения материала впереди вершины трещины. Корректные экспериментальные данные по формированию пластической зоны у вершины трещины, и их учёт в математическом описании процесса роста трещины, позволят повысить точность прогнозирования разрушения, особенно для циклического нагружения с переменной или случайно амплитудой, где история нагружения оказывает существенное влияние на процесс распространения усталостной трещины.

Задачей данного исследования является развитие метода корреляции цифровых изображений для регистрации деформаций, как за, так и впереди вершины усталостной трещины в процессе циклических испытаний; определение величины закрытия трещины в зависимости от места проведения измерений. Данная методика в дальнейшем планируется к применению для циклических испытаний с переменной амплитудой, в том числе для случайного спектра нагружения с отслеживанием распространения трещины в автоматическом режиме.

Испытания проводили на плоских образцах в форме лопатки из алюминиевого сплава В96 с боковым надрезом глубиной 4 мм и предварительно пророщенной трещиной длиной 7 мм. Нагружение проводили по синусоидальному закону с частотой f=0,01 Гц; при этом проводилась регистрация изображений поверхности образца у вершины трещины. По результатам обработки полученных изображений с помощью программы VIC 2D были рассчитаны поля деформаций, по которым затем строились петли гистерезиса в координатах «нагрузка-перемещение» и определялся уровень закрытия трещины на разном расстоянии от её вершины (как впереди, так и позади).

В работе продемонстрировано, что метод корреляции цифровых изображений может эффективно применяться для определения полей деформаций на больших увеличениях с целью определения величины нагрузки закрытия усталостной трещины при медленном цикле нагружения, как впереди вершины трещины, так и вдоль её фронта. По результатам проведённых экспериментальных исследований показано, что имеется зависимость между внешним видом петли гистерезиса и местом проведения измерения при помощи оптического датчика деформаций. Это не сопровождается существенным изменением величины нагрузки при закрытии трещины. Исключением из этой зависимости является точка в области вершины трещины, а также в области, расположенной перед ней (сплошной материал – processing zone).

Литература

1. Nowell D., Matos P., Application of digital image correlation to the investigation of crack closure following overloads // Procedia Engineering, 2010, №2, P. 1035–1043.

2. Carroll J. et al, Investigation of fatigue crack closure using multiscale image correlation experiments // Engineering Fracture Mechanics, 2009, № 76, P. 2384–2398.

3. Yusof F., Lopez-Crespo P., Withers P., Effect of overload on crack closure in thick and thin specimens via digital image correlation // International Journal of Fatigue, 2013, № 56, P. 17–24.

4. Mathieu F., Hild F., Roux S., Identification of a crack propagation law by digital image correlation // International Journal of Fatigue, 2012, № 36, P. 146–154

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ ВОЛН ЛЭМБА

Еремин А.В.[1,2], Панин С.В.[1,2], Бяков А. В.[1,2], Сундер Р.[2,3]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

[2] *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (НИ ТПУ), д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация*

[3] *Bangalore Integrated System Solutions (P) ltd., No.497E, 14th Cross, 4th Phase, Peenya Industrial Area, Bangalore – 58, Karnataka, India.*

e-mail: eremin_av@bk.ru, svp@ispms.ru

Изменение парадигмы сервисного обслуживания конструкций и агрегатов от учета времени наработки оборудования (time-based concept) к концепции сервисного обслуживания на основе оценки механического состояния конструкции (condition-based concept) позволяет получить значительное преимущество, как с точки зрения безопасности эксплуатации, так и с позиции экономии. Для осуществления такого перехода необходима разработка встроенных неразрушающих методов контроля [1], позволяющих оценивать механическое состояние в процессе эксплуатации. Встроенный контроль состояния материалов на основе волн Лэмба является одним из перспективных направлений исследований [2-4]. Цель настоящей работы является оценка перспективы использования встроенного акустического метода контроля на основе волн Лэмба для интегральной оценки механического состояния слоистых стеклопластиковых материалов при циклических испытаниях.

В испытаниях на одноосное циклическое растяжение использовали плоские образцы стеклопластикового композита, на поверхность которого приклеивали пьезоэлектрические преобразователи, выполняющие роль генераторов и приёмников упругих ультразвуковых колебаний. Используемая форма генерируемого сигнала – 5 циклов синуса, модулированные окном Хеннинга; частоты сигналов составляли 123 и 243 кГц. Дополнительным источником информации служили оптические изображения поверхности образца, полученные с помощью цифровой фотокамеры Canon 550D.

По регистрируемым акустическим сигналам и изображениям поверхности объекта контроля рассчитывали ряд информативных параметров (энтропия, дисперсия, огибающая сигнала, энергия спектра мощности и др.), по изменениям которых проводили оценку механического состояния образца по мере возрастания циклов наработки. Кроме того, оборудование испытательной машины позволяет записать амплитуду перемещения подвижного захвата и тем самым, охарактеризовать податливость образца (модуль упругости).

Характер изменения обозначенных параметров позволяет выявить три основные стадии разрушения материала, а также «нулевую» стадию, связанную с врезанием губок гидравлических захватов в материал образца (накладки) на начальных циклах. Первая стадия характеризуется значительным растрескиванием матрицы композита, а также повреждением отдельных армирующих волокон, что ведёт к скачкообразным изменениям параметров акустического сигнала, а также к существенному изменению состояния поверхности образца, обуславливая увеличение средней энтропии изображения. На второй стадии происходит медленный стабильный рост образовавшихся микротрещин, что проявляется в монотонном изменении параметров акустического сигнала и средней энтропии изображения поверхности образца. Появление третьей стадии обусловлено переходом монотонного увеличения размеров дефектов в материале к их быстрому и неконтролируемому росту. Третья стадия также отличается скачкообразным изменением информативных параметров, но, по сравнению с первой стадией, их амплитуда намного меньше. При этом оптический метод способен выявить только переход от первой стадии ко второй и является дополнением к акустическому с целью визуальной оценки состояния материала и определения мест локализации расслоений.

Исходя из полученных экспериментальных результатов по контролю состояния стеклопластиковых композиционных материалов при циклическом одноосном растяжении, можно сделать заключение, что предлагаемый подход позволяет выявлять характерные стадии циклического разрушения и накопления дефектов композиционными материалами. При этом начала перехода от одной стадии к другой акустическим методом выявляется на 3000-4000 циклов раньше, чем по изменению модуля упругости (податливости) объекта контроля.

Литература

1. Schubel P., Crossley R., Boateng E., Hutchinson J., Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades // Renewable Energy. – 2013. – № 51. – P. 113–123.
2. Su Z., Ye L., Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications // Lecture notes in applied and computational mechanics. – 2009. – № 48. – 355 p.
3. Staszewski W. et al., Health monitoring of aerospace composite structures – Active and passive approach, Composites Science and Technology. – 2009. – № 69. – P. 1678–1685.
4. Cho H., Lissenden C., Structural health monitoring of fatigue crack growth in plate structures with ultrasonic guided waves // Structural Health Monitoring. – № 11(4). – P. 393–404.

МОНОФАЗНЫЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ СИСТЕМЫ Cu-Sn С КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ

Макрушина А.Н., Макаров С.В., Плотников В.А.

Алтайский государственный университет, д. 90, пр. Красноармейский, г. Барнаул, 656049, Российская Федерация, e-mail: makrushina3008@mail.ru

Причина повышенного внимания к системе Cu-Sn связана со структурными особенностями образования интерметаллических фаз в тонких пленках Cu/Sn или сплава Cu-Sn, нанесенных на медную подложку. Медь интенсивно диффундирует из подложки в слой олова при относительно невысоких температурах. Этот процесс сопровождается синтезом интерметаллида Cu_6Sn_5 [1], а также формированием ориентированных столбчатых структур фазы Cu_6Sn_5 с диаметром до десятков микрометров [2]. Механизмы ориентированного роста интерметаллидов и формирования столбчатых структур в настоящее время слабо изучены.

Тонкопленочные образцы готовились путем конденсации на подложки из стекла толщиной 2 мм из паровой фазы тонкопленочных последовательных слоев меди и олова. После нанесения на подложку тонких слоев исходных веществ проводили отжиг в вакууме путем нагрева в условиях высокоинтенсивного теплового потока, создаваемого вольфрамовым нагревателем резистивного испарителя.

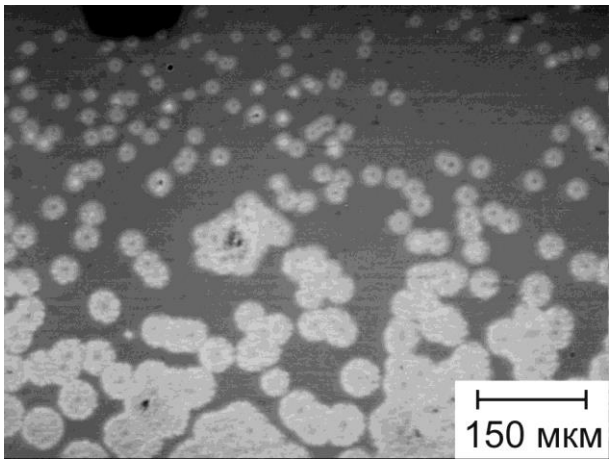


Рис. 1. Волна синтеза в тонкопленочной бинарной системе Cu – Sn

Реакции в тонкопленочной структуре Cu/Sn протекает в виде волны синтеза, перемещающейся по поверхности пленки. Граница размыта и представляет собой некоторую область с разной концентрацией реакционных островков, которые разрастаясь объединяются, формируя конечный тонкопленочный агрегат.

Структура поверхности тонкой интерметаллической пленки, полученная с помощью сканирующего зондового микроскопа, представлена на рис. 2. Поверхность пленки (рис. 2) представляет собой островки интерметаллического соединения Cu_6Sn_5, сформированные в ходе реакции между медью и оловом, в процессе которой пленка Cu/Sn трансформировалась в интерметаллическую фазу. Видно, что пленка имеет столбчатую структуру, состоящую, очевидно, из кристаллов Cu_5Sn_6, ориентированных перпендикулярно поверхности подложки. Островки, равномерно распределенные по поверхности пленки, в сечении являются равноосными, средний размер составляет 100 нм.

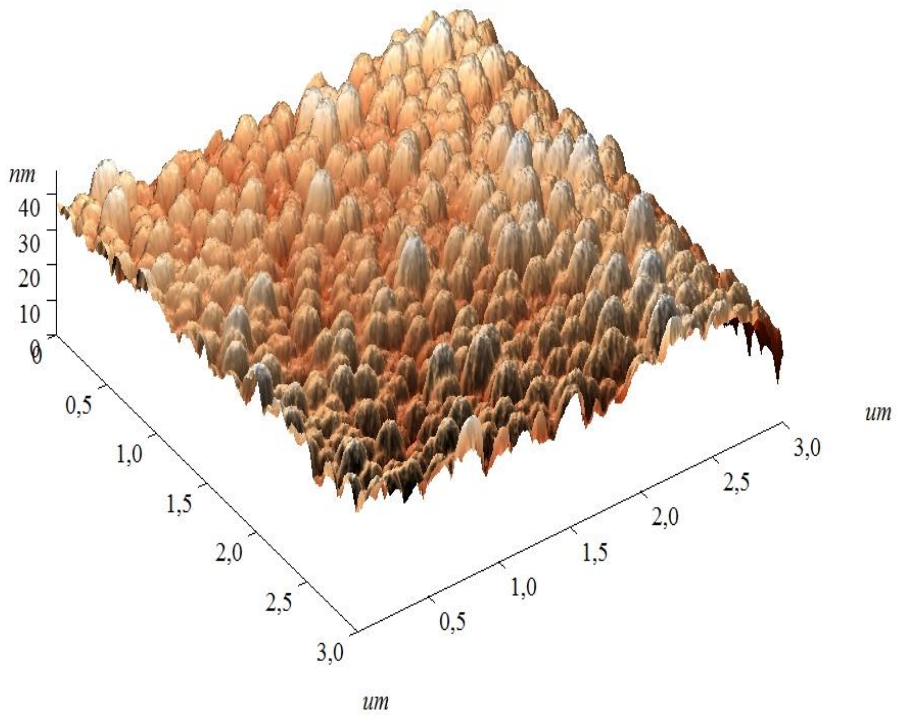


Рис. 2. Макроскопическая структура поверхности тонкой пленки системы Cu-Sn

Ориентированный рост фазы Cu_6Sn_5 в тонких бинарных пленках Cu/Sn наблюдался ранее в ряде работ [2,3]. Однако механизм возникновения преимущественной ориентации Cu_6Sn_5 недостаточно изучен. Как теоретические, так и экспериментальные исследования начальных стадий роста кристаллов интерметаллида, проведенные преимущественно для системы Cu - жидкий Sn, показали, что зародыши Cu_6Sn_5, кристаллизующиеся на поверхности меди, имеют хаотическую ориентацию [4]. Даже на монокристальной медной подложке при любой ориентации поверхности (111) или (100) монокристалла предпочтительной ориентации фазы Cu_6Sn_5 не обнаружено [5].

Таким образом, в процессе нанесения медного слоя на аморфную подложку определяющим для последующего формирования ориентированной столбчатой структуры интерметаллической пленки является поликристаллический слой меди. Можно предположить, что кристаллографические плоскости (111) меди параллельны плоскости подложки. Именно медь оказывает значительное ориентирующее действие на рост интерметаллической фазы Cu_6Sn_5, ориентируя его по направлению [111] меди.

Литература

1. Xu G.-S., Zeng J.-B., Zhou M.-B., Cao S.-S., Ma X., Zhang X.-P. // International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. 2012. P. 289–293;

2. Choudhury S. F., Ladani L. // Journal of Electronic Materials. 2014. V 43., p. 996–1004;

3. Gagliano R.A., Ghosh G., Fine M.E. // Journal of Electronic Materials. 2002. V. 31. No. 11. P.1195-1202;

4. Huh J.Y., Hong K.K., Kim Y.B., Kim K.T. // Journal of Electronic Materials. 2004. V. 33. No. 10. P.1161–1170;

5. Suh J.O., Tu K.N., Tamura N. // JOM. 2006. V.58. No.6. P.63–66.

РАЗВИТИЕ ЦКП «ПЛАСТОМЕТРИЯ» ИМАШ УрО РАН В РАМКАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С НАУКОЙ И ПРОИЗВОДСТВОМ

Смирнов С.В., Гладковский С.В., Акилова И.Б.

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

ЦКП “Пластометрия” ИМАШ УрО РАН функционирует с апреля 2003 г. в рамках Положения о центре коллективного пользования «Пластометрия» УрО РАН, (постановление Президиума УрО РАН № 2-7 от 13.02. 2003 г.). Центр является вспомогательным научно-исследовательским структурным подразделением Института машиноведения (ИМАШ Уро РАН), осуществляющим комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению возможности научным сотрудникам института, других институтов УрО РАН, а также представителям сторонних организаций проводить фундаментальные и прикладные научно-исследовательские работы в области механики и физики прочности и разрушения с использованием находящегося на балансе Института уникального дорогостоящего оборудования. ЦКП «Пластометрия» включает в себя три научно-исследовательских и технологических подразделения: Испытательный центр; Лабораторию неразрушающего контроля; Лабораторию объемного и поверхностного деформирования. Штатная численность ЦКП составляет 37 человек, из них: докторов наук – 8 человек, кандидатов наук – 19 человек и инженерно-технического персонала – 10 человек. Входящий в состав ЦКП Испытательный центр ИМАШ УрО РАН аккредитован Федеральной службой по аккредитации и признан компетентным в системе «НАНОСЕРТИФИКА», Лаборатория неразрушающего контроля аттестована в Системе неразрушающего контроля Госгортехнадзора России.

ЦКП специализируется в следующих приоритетных научных направлениях: объемная и поверхностная деформационно-термическая обработка материалов с целью формирования оптимальной структуры материалов включая микро-, субмикро- и нанокристаллическую структуру; исследование механических, трибологических свойств и характеристик сопротивления разрушению материалов на разных масштабных уровнях; исследование физических свойств и поврежденности материалов методами неразрушающего контроля; исследование состава, структуры и состояния поверхности материалов и их изломов.

Основной задачей Центра является предоставление научным коллективам института, другим подразделениями УрО РАН и сторонним организациями на принципах коллективного пользования современного оборудования для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области физики и механики функциональных, конструкционных, композиционных материалов и покрытий, с приоритетом исследования в области наноматериалов и нанотехнологий в рамках тематики института, целевых программ РАН и УрО РАН, НАН стран СНГ региональных, федеральных и международных инициативных проектов и программ.

За последнее годы приобретено и введено в эксплуатацию современное оборудование для механических испытаний материалов (универсальные испытательные машины Zwick Z2.5 и Super “L60”, а также высокочастотная резонансная машина MIKROTRON). Балансовая стоимость оборудования ЦКП в настоящее время составляет 126,44 млн. рублей. Научно-исследовательские и экспертизные работы по линии ЦКП проводятся по заказам научных институтов УрО РАН на безвозмездной и хоздоговорной основе (Институт металлургии УрО РАН; Институт физики металлов УрО РАН; Институт химии твердого тела УрО РАН и др.), а также крупнейших научно-производственных организаций, промышленных предприятий и инновационных компаний Уральского региона и других регионов России (ОАО "ГРЦ Макеева"; ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина»), ОАО «Каменск-Уральский литейный завод», ОАО "Металлургический завод им. А.К. Серова", ОАО "Уралбурмаш", ЗАО "НПФ "АРГОС", ООО "Комплекс", ООО "УИС-энергетика", ООО «Буринвест сервис» и др.). Общий объем выполненных НИР и оказанных услуг за последние 4 года составил 108,05 млн. рублей. В ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН разработано 5 уни-

кальных для России методик анализа фазового состава, магнитных и трибологических свойств наноструктурных материалов. С использованием оборудования центра за период с 2012 г. опубликовано 112 научных статьи и получено 14 патентов РФ, регулярно проводятся исследования по грантам РФФИ и РНФ, программам Президиума РАН и проектов УрО РАН. Неоднократно проводились экспертизные работы с представлением Экспертных заключений, в том числе для арбитражных судов. Оборудования центра активно используется в учебном процессе при подготовке специалистов и кадров высшей квалификации: за период с 2012 г. студентами УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина защищено 26 выпускных квалификационных работ и магистерских диссертаций, подготовлено 9 кандидатов наук из числа аспирантов ИМАШ УрО РАН.

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНО-МЕХАНО-ТЕРМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Макаров А.В.

Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация; Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация, e-mail: av-mak@yandex.ru

В последнее время резко возрос интерес к высокоэнергетическим лазерным способам обработки поверхности сталей и сплавов. Это обусловлено появлением современных, экономичных в эксплуатации, компактных лазеров нового поколения – волоконных лазеров, а также бурным развитием лазерных аддитивных технологий изготовления покрытий и деталей по заданной компьютерной модели, предусматривающих многослойную наплавку тонких слоев металлических порошков сканирующим лазерным лучом. Указанное обстоятельство обусловило актуальность поиска путей дополнительного улучшения свойств материалов, модифицированных лазерным излучением.

Цель работы – рассмотреть возможности и металлофизические аспекты дополнительного упрочнения, повышения теплостойкости и износостойкости металлических сплавов при использовании комбинированных способов, включающих лазерную закалку или наплавку с последующими деформационными и термическими обработками.

Показано, что дополнительные механо-термические обработки обеспечивают дальнейшее существенное повышение эксплуатационных свойств изделий за счет создания в модифицированных лазером поверхностных слоях более благоприятного структурного и напряженного состояний, а также улучшения качества поверхности, оплавленной лазерным излучением. Так, лазерное упрочнение коленчатых валов тепловозов из высокопрочного чугуна приводит к кратному повышению износостойкости, однако сопровождается возникновением остаточных растягивающих напряжений на границах закаленных участков, что может существенно (до 2 раз) снижать усталостную прочность чугуна. Последующий отпуск при 300-550°С, уменьшающий пиковые напряжения растяжения, и обкатывание роликом, переводящее их в напряжения сжатия, повышают предел выносливости чугуна, обработанного излучением лазера. Обработка холодом цапф буровых долот из цементованной хромоникелевой стали обеспечивает дополнительное повышение твердости закаленных лазером беговых дорожек и сопротивление контактно-усталостному разрушению при испытании долот в условиях качения на металлическом забое. Комбинированная обработка, включающая газопорошковую лазерную наплавку с оптимизированным высокотемпературным отжигом, позволяет создавать износостойкие хромо-никель-бор-кремниевые покрытия с особо высоким уровнем теплостойкости (до 1000°С) за счет формирования термически стабильного высокопрочного износостойкого каркаса из крупных карбидов и боридов хрома [1].

Эффективное дополнительное упрочнение, рост теплостойкости и трибологических свойств закаленных лазером армко-железа, углеродистых и низколегированных сталей достигается проведением фрикционной обработки скользящим индентором, формирующей структуру деформационно состаренного нанокристаллического мартенсита. Важно подчеркнуть, что при проведении наноструктурирующей фрикционной обработки лазерная закалка позволяет в наибольшей степени реализовать положительное влияние на упрочнение процессов деформационного динамического старения мартенсита. Указанные процессы наиболее эффективно развиваются в неотпущенном мартенсите, который на практике в изделиях как раз и может быть получен современными поверхностными упрочняющими обработками (лазерной, электронно-лучевой, плазменной), часто не требующими проведения последующего отпуска. Комбинированная обработка закаленных низкоуглеродистых сталей, включающая лазерную закалку, наноструктурирующую фрикционную обработку и отпуск при температуре 450°С, может рассматриваться в качестве способа формирования в сталях «бимодальной» структуры, состоящей из высокопрочных областей с наноструктурой и участков из рекристаллизованных зерен феррита субмикронных (0,2-0,5 мкм) размеров с повышенной пластичностью. Фрикционная обработка хромоникелевых лазерных наплавок позволяет ис-

ключить дефекты механического шлифования, обеспечивая формирование качественной поверхности с улучшенными характеристиками прочности и износостойкости [2].

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-10-1-22) и в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 01201375904.

Литература

1. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. // МиТОМ. 2015. №3. С.39–46.
2. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Саврай Р.А., Малыгина И.Ю. // Вектор науки ТГУ. 2015. №4 (34). С.60–67.

ОПИСАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В РАМКАХ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ

Чечулина Е.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), д. 29, пр. Комсомольский, г. Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: Zhenya-chechulina@yandex.ru

Неустойчивое, скачкообразное деформирование (эффект Портевена – Ле Шателье (ПЛШ)), характеризующееся появлением зубцов на диаграмме напряжение – деформация, давно привлекает внимание исследователей. 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 аэродинамических характеристик изделий.

Экспериментальные и теоретические исследования данного эффекта направлены на установление критерия потери устойчивости пластического течения и определение области существования такой неустойчивости, с целью исключения из технологического процесса опасных режимов.

В работе предлагается трехуровневая математическая модель для описания эффекта Портевена – Ле Шателье в поликристаллических материалах при термомеханическом нагружении. Основная задача состоит из нескольких связанных между собой подзадач: задачи определения напряженно-деформированного состояния, задачи теплопроводности, задачи диффузии.

Следует отметить, что свойства материала на макроуровне в значительной степени определяются его микроструктурой. Большинство исследователей причину неустойчивости пластического деформирования связывают с процессами диффузии и взаимодействием дислокаций с примесными атомами. Учет эволюции мезо- и микроструктуры возможен с использованием многоуровневых моделей. В структуру модели вводятся внутренние переменные, которые отражают механизмы деформирования на мезо- и микроуровнях [1, 2].

В соответствии с известными данными о структуре и механизмах деформирования в рассмотрение вводится три масштабных уровня: макроуровень – уровень представительного объема макромасштаба, мезоуровень I – уровень отдельного кристаллита и мезоуровень II – уровень «субкристаллита» (субзерна, фрагмента).

Основным механизмом неупругого деформирования считается движение краевых дислокаций, которые преодолевают различные препятствия: точечные (примесные атомы), линейные (барьеры Ломера–Коттрелла и другие) и объемные (выделения вторичных фаз и другие). Подвижность дислокаций в неидеальных кристаллах уменьшается за счет их взаимодействия друг с другом и с другими дефектами. Такое взаимодействие приводит к торможению движущихся дислокаций.

Подход к описанию дислокационной структуры основан на введении однородных плотностей дислокаций на каждой системе скольжения и получении эволюционных уравнений, описывающих механизмы их зарождения и взаимодействия. Общая плотность дислокаций на каждой системе скольжения выражается в виде суммы плотностей мобильных и иммобильных дислокаций. Эволюционные уравнения для плотностей мобильных и иммобильных дислокаций вводятся для мезоуровня II. Для учета взаимодействия дислокаций с соседними зернами вводятся положительные и отрицательные дислокации на каждой системе скольжения.

Анализ работ ряда авторов позволяет выделить следующие типы взаимодействия дислокационных структур: образование (зарождение) дислокаций, аннигиляцию, торможение мобильных дислокаций барьерами дислокационной (Ломера–Коттрелла) и недислокационной природы (границами зерен, дислокациями леса, примесными атомами), ремобилизация иммобильных дислокации из-за приложенной нагрузки и/или тепловой активации. Указанные механизмы позволяют описать процессы деформирования, в которых велика роль диффузионных процессов, в частности эффект Портевена –Ле Шателье.

Переход от микроскопического описания пластического течения к мезоскопическому осуществляется с помощью соотношения, полученного на основе уравнения Орована. Текущее состояние микроструктуры отслеживается через плотности дислокаций, которые служат внутренними переменными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 16-31-00215 мол_а.

Литература

1. Ашихмин В.Н., Волегов П.С., Трусов П.В. Конститутивные соотношения с внутренними переменными: общая структура и приложение к текстурообразованию в поликристаллах// Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Механика. – 2006. – № 14. – С. 11–26.

2. Трусов П.В., Швейкин А.И. Теория определяющих соотношений. Ч.2. Теория пластичности. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 243 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СТРУКТУРУ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Шадринов Н.В.[1,2], Соколова М.Д.[1,2]

[1]*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, д. 1, Октябрьская г. Якутск, 677007, Российская Федерация, e-mail: Nshadrinov@gmail.com*

[2]*ФГАОУ ВПО Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, д. 58, ул. Белинского, г. Якутск, 677007, Российская Федерация*

Исследование механики разрушения предоставляет солидную основу для выбора материалов и фундаментального понимания явления, что необходимо для конструирования микроструктуры новых полимерных смесей. Следовательно, изучение процессов деформации и разрушения, является актуальной задачей. Целью данной работы является исследование структуры материала при растяжении в режиме In-situ, а именно изучение механизма различных видов деформаций и начальных стадий прорастания трещин, особенно в местах межфазных границ смешиваемых полимеров или различного рода наполнителей методом атомно-силовой микроскопии [1-2].

В работе представлены результаты исследования деформации полимерных композитов на основе бутадиен-нитрильного каучука (БНКС-18), сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и различных наполнителей [3]. Для исследования полимерных материалов в деформированном состоянии методом атомно-силовой микроскопии, разработано специальное устройство совместимое с АСМ. Разработанное устройство защищено патентом РФ [4].

Результаты исследования композита в присутствии активированного природного цеолита показали, что введение цеолита, приводит к значительному повышению поверхностной энергии СВМПЭ. Уменьшение разницы в значениях силы адгезии на поверхностях СВМПЭ и эластомерной матрицы, привело к интенсификации взаимодействия на границе раздела фаз и образованию межфазных слоев. Образование развитой межфазной границы между СВМПЭ и БНКС-18 в присутствии активированного цеолита зафиксировано методом отображения фазового контраста. Установлено, что данный переходный слой, представляет собой классический слой 2 типа, который образуется по коллоидно-химическому механизму и описан в работе Ю.С. Липатова [5].

Исследование участков границы БНКС-18/СВМПЭ при различных степенях деформации показало, что при увеличении растяжения увеличивается разрыв между ними. Установлено, что для образцов полимерэластомерных композитов, изготовленных без активированного цеолита глубина разрыва между СВМПЭ и БНКС-18 намного больше, чем у образца с активированным цеолитом, что опять же свидетельствует об образовании более развитой межфазной границы при использовании компатибилизатора.

Заключение

Методом атомно-силовой микроскопии установлено образование развитой межфазной границы между БНКС-18 и СВМПЭ в присутствии механоактивированного природного цеолита. Образование развитого переходного слоя обеспечивает повышенную гибкость макромолекул в этой зоне и за счет этого происходит более быстрое протекание релаксационных процессов при нагрузке и деформации материала, в том числе при пониженных температурах. Исследование деформации полимерэластомерного композита показало, что при одноосном растяжении, введение механоактиврованного цеолита приводит к значительному уменьшению глубины микроразрывов на межфазных границах, приводящих к макромолекулярному разрушению материала.

Литература

1. Шадринов Н.В., Соколова М.Д. Исследование влияния активированного цеолита на деформацию полимерэластомерных композитов методом атомно-силовой микроскопии // Материаловедение. 2014. № 7. С. 17-22.

2. Соколова М.Д., Шадринов Н.В., Давыдова М.Л., Сафронов А.Ф. Исследование межфазного взаимодействия в полимерэластомерных композициях методом атомно-силовой микроскопии // Инженерный вестник Дона. 2010. №4. http://www.ivdon.ru

3. Соколова М.Д., Давыдова М.Д., Шадринов Н.В. Морозостойкие композиты на основе бутадиен-нитрильного каучука, сверхвысокомолекулярного полиэтилена и природного цеолита // Материаловедение – 2010. -№5. С. 40-45.

4. Патент РФ №2521267 Устройство для исследования материалов в деформированных состояниях методом атомно-силовой микроскопии. Автор Шадринов Н.В., 29.04.14, бюл. № 18.

5. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров // Химия: Москва, 1991. С. 260

ОПЫТ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СТАЛЬНОГО СОСУДА ПОД ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ

Кулак С.М., Новиков В.Ф., Баранов А.В.

Тюменский государственный нефтегазовый университет, д. 38, ул.Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация, e-mail: physics1@tgngu.tyumen.ru

Главным фактором, определяющим напряженное состояние корпусов сосудов, является давление рабочей среды. Под действием внутреннего давления стенки сосуда находятся в объемном напряженном состоянии, когда вдоль образующей действует меридиональное (осевое) напряжение σ_s, по касательной окружности – кольцевое напряжение σ_τ и по нормам к стенке – радиальное напряжение σ_r. Таким образом, стенки сосудов подвергаются многоосному нагружению.

Деформации стенок сосудов под давлением, возникающие в процессе их испытаний и эксплуатации, а также коррозионное уменьшение толщины стенок создают предпосылки роста механических напряжений ускоряющих процессы деформационного старения, охрупчивания материала и снижающие его усталостные характеристики.

На первый план решения проблемы о надёжности сосудов высокого давления выдвигаются задачи расчёта на прочность, устойчивость и долговечность. Для их решения необходимы информация о механических нагрузках и воздействиях на стенки, анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС), что в итоге используется при расчётах их надёжности и ресурса.

В настоящее время интенсивно развиваются численные методы расчёта НДС металлических конструкций. Среди этих методов наиболее распространён метод конечных элементов.

Для оценки НДС стальных конструкций в условиях эксплуатации применяются приборные методы: тензометрический, рентгеновский, оптический, ультразвуковой, магнитный (коэрцитиметрический, электромагнитный, метод скачков Баркгаузена, метод магнитной памяти, метод магнитоупругой памяти МУП).

Наиболее чувствительным и удобным методом контроля механических напряжений стали является метод магнитоупругого размагничивания МУП. Он обладает возможностью контактного измерения без нарушений изоляционных покрытий, производительностью и простотой реализации. Магнитоупругое размагничивание весьма существенно и при приложении равных и однозначных ортогональных напряжений одного знака, и по этой причине оно может оказаться более чувствительным индикатором эквивалентных напряжений, чем например коэрцитивная сила.

Цель работы: исследование магнитоупругого размагничивания стального баллона действием внутреннего давления.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. установление закономерности изменения напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности (ЛН) стенки сосуда с ростом меридиональных и кольцевых механических напряжений вызываемых внутренним давлением;
2. исследование зависимости коэрцитивной силы стальной оболочки сосуда от создаваемых в ней давлением двухосных механических напряжений;
3. проведение тензометрических измерений деформации и расчёт напряжённого состояния стенок стального сосуда, при создании в нём внутреннего давления.

Исследования проводились на стальном баллоне углекислотного огнетушителя ОУ-3, в котором создавалось сложное напряжённое состояние внутренним давлением воды.

Зависимость изменения нормальной ΔH_n и тангенциальной ΔH_τ составляющих напряжённости магнитного поля рассеяния ЛН от величины внутреннего давления воды стенку баллона показаны на рисунках 1,2. Сплошная линия аппроксимирует результаты измерений в точках ЛН, удалённых на разном расстоянии от выпускного патрубка: ♦-10см;■-20см;▲-30см; **x**-40см.

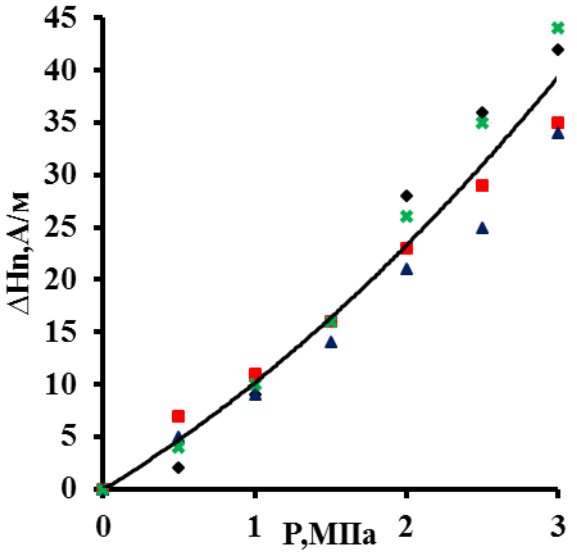


Рис.1. Зависимость изменения нормальной ΔHn составляющей напряжённости магнитного поля рассеяния локальной намагниченности баллона от величины внутреннего давления.

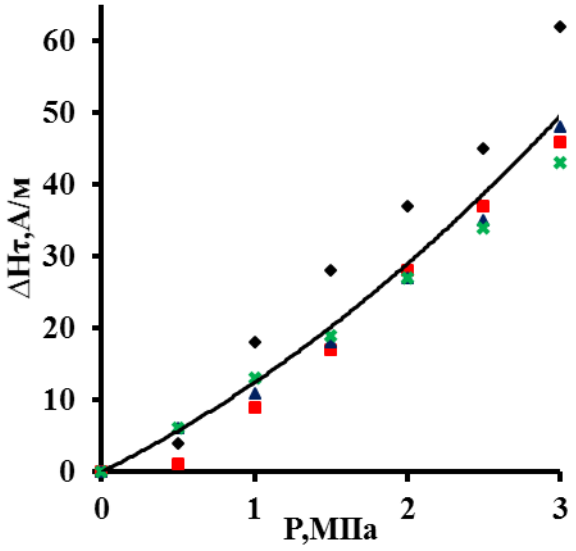


Рис.2. Зависимость изменения тангенциальной ΔH_τ составляющей напряжённости магнитного поля рассеяния локальной намагниченности баллона от величины внутреннего давления.

Выводы:

1. показано, что убыль нормальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности стенки сосуда при росте внутреннего давления может быть метрологическим параметром многоосных механических напряжений;
2. коэрцитивная сила стальной оболочки баллона при её двухосной деформации остаётся неизменной, и не может быть индикатором уровня механических напряжений.
3. показано, что метод магнитоупругого размагничивания стали обладает высокой чувствительностью к механическим напряжениям, простотой реализации и экспрессивностью по сравнению с тензометрическим методом.

Литература

1. СТО Газпром 2-2.3-491-2010 Техническое диагностирование сосудов, работающих под давлением на объектах ОАО «ГАЗПРОМ».

2. РД 03-421-01 Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. [Текст]. Введ.2001-09-06. – Москва: Госгортехнадзора России, 2001. – 86 с.

3. Завьялов А.П., Лукьянов В.А., Якубович В.А. Разработка рекомендаций по использованию метода конечных элементов при оценке технического состояния трубопроводных обвязок оборудования нефтегазовых производств / Нефть и газ. 2005. №3. С. 68–74.

4. Расчёт на прочность тонкостенных оболочек вращения и толстостенных цилиндров: Метод. пособ./Сост.: В.Ф. Першин Ю.Т., Селиванов.3-е изд., стер.Тамбов: Из-во Тамб. гос. техн.ун-та, 2004,20с.

5. Новиков В.Ф., Важенин Ю.И., Бахарев М.С., Кулак С.М., Муратов К.Р. Диагностика мест повышенной разрушаемости трубопровода. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. –200с.

СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВЫХ ПОКРЫТИЙ «КАРБИД ТИТАНА – МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СВЯЗКА» С ДВУХУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

Прибытков Г.А., Криницын М.Г., Барановский А.В., Коржова В.В., Коростелева Е.Н., Дураков В.Г.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН»,
Томский исследовательский политехнический университет
г. Томск, Российская Федерация, e-mail: gapribyt@mail.ru

Хорошо известно, что композиционные материалы и покрытия со структурой из дисперсных твердых частиц, заключенных в металлическую матрицу (связку), обладают уникальным сочетанием твердости, прочности, пластичности и износостойкости при абразивном износе и в контактных парах. При этом характеристики прочности и износостойкости композитов определяются как физико-механическими свойствами упрочняющей фазы и металлической связки, так и структурой композита. Основные характеристики структуры - дисперсность и объемная доля упрочняющей фазы и однородность ее распределения в металлической матрице. Таким образом, создание заранее заданной структуры металломатричного композита является ключевой задачей в технологиях получения материалов с рекордными характеристиками твердости, прочности, износостойкости.

Наибольший интерес в качестве дисперсной упрочняющей фазы в металломатричных композитах представляет карбид титана, имеющий рекордную среди металлических карбидов твердость, хорошую совместимость с большинством металлов и сплавов, применяемых в промышленности, и равноосную форму частиц. Благодаря вышеперечисленным достоинствам металломатричные композиты с дисперсным карбидом титана исследуются и применяются в качестве спеченных материалов (карбидостали) и покрытий. При наплавке покрытий обычно используют порошковые смеси карбида титана и металла – связки, предварительно нанесенные на металлическую подложку или подаваемые в зону наплавки порошковым питателем. Для расплавления порошковой присадки используют лазерный луч, электронный пучок, электрическую дугу, высокочастотный нагрев и др. При этом в подавляющем большинстве применяемых технологий при наплавке происходит перекристаллизация исходного порошкового карбида с его растворением в расплаве наплавочной ванны и последующеим выпадением карбидных частиц из пересыщенного раствора при охлаждении. В таких условиях практически невозможно контролировать морфологию и дисперсность карбидных частиц и их распределение в металлической матрице. Представляется перспективной следующая двухступенчатая технология создания композиционного покрытия с контролируемой структурой: а) получение композиционных порошков с заранее заданной дисперсностью и объемной долей упрочняющей карбидной фазы в металлической матрице необходимого элементного состава; б) наплавку композиционного порошка при режимах, исключающих перегрев наплавочной ванны с перекристаллизацией исходного карбида. Для контролируемого нагрева порошковой присадки целесообразно использовать концентрированные источники энергии - лазерный или электронный луч.

В настоящей работе приведены результаты исследования композиционных порошков «карбид титана – металлическая связка, полученных по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и электроннолучевых покрытий, наплавленных с применением СВС порошков. Структурные исследования СВС порошков и наплавленных покрытий проводили методами рентгеноструктурного анализа, оптической и растровой электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа. В качестве металлической связки металломатричных композитов использовали титан, высокохромистый чугун и быстрорежущую сталь Р6М5. Наплавку покрытий проводили в вакууме на установке ИФПМ СО РАН, состоящей из источника электронов, системы управления сканирующим электронным лучом, порошкового питателя и манипулятора для перемещения подложки относительно сканирующего электронного луча. На наплавленных покрытиях определяли твердость и абразивную износостойкость.

Исследование структуры СВС продуктов показало, что вне зависимости от состава металлической связки дисперсность карбидной фазы монотонно уменьшается по мере увеличения содержания порошка металлической связки в реакционных смесях. Такая зависимость объясняется понижением температуры горения вследствие поглощения тепла экзотермической реакции металлической связкой, инертной в тепловом отношении. Таким образом, вариацией содержания связки в реакционных смесях были получены металломатричные композиты, в которых средний размер карбидных частиц можно было произвольно изменять от 1 до 10 – 15 мкм.

Электроннолучевой наплавкой композиционных порошков, отсеянных из раздробленных СВС спеков, были получены покрытия толщиной 2-5 мм на подложках из титана и малоуглеродистой стали. Структура покрытий в основном была идентичной структуре наплавляемых композиционных порошков, однако в отношении однородности распределения карбидной фазы были выявлены различия. В наплавках порошками с титановой связкой на подложку из титана ВТ1-0 распределение карбидной фазы было однородным по объему покрытий. Из-за плохой теплопроводности титана (22 вт/м·К) отвод тепла в подложку был затруднен. Это обеспечивало прогрев наплавочной ванны до температур плавления титановой связки в структуре гранул композиционного порошка и равномерное распределение карбидной фазы по объему закристаллизовавшейся наплавки.

В наплавках на стальную подложку порошков со связками из чугуна и быстрорежущей стали частицы карбида титана находились в двух различных структурных состояниях. Из-за относительно большой теплопроводности стальной подложки (50 вт/м·К) значительная часть энергии электронного луча уходила в подложку. Поэтому крупные гранулы расплавились лишь частично. В результате сформировался композит с двухуровневой структурой, состоящей из сохранившихся гранул и металлической связки с карбидными частицами, высвобожденными из расплавленных гранул.

Результаты изменения твердости и абразивной износостойкости наплавленных покрытий показали, что структура покрытий имеет решающее значение для физико-механических свойств и триботехнических характеристик.

ПОДОГРЕВ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Старостин Н.П., Васильева М.А.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, д. 20, ул. Автодорожная, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, e-mail: nikstar56@mail.ru, eowa@mail.ru

Высокая гибкость полиэтиленовых труб позволяет выпускать их длинномерными отрезками и поставлять в районы строительства газопроводов в бухтах. Одним из препятствий на пути внедрения таких труб в регионах холодного климата является недостаточная изученность возможности разматывания в условиях низких климатических температур.

Согласно СТО 45167708-01-2007 разматывание длинномерных труб (из бухт или катушек) осуществляется при температуре наружного воздуха не ниже плюс 10 °С. При более низкой температуре трубы в бухтах или катушках подогревают до требуемой температуры, например, размещая трубы на время не менее 4 часов в отапливаемое помещение с температурой воздуха не ниже (20±3) °С или, если это невозможно, разогревать при помощи тепловой воздуходувной машины до достижения температуры наружной и внутренней поверхности бухты не ниже (15±5) °С.

Данная работа посвящена разработке методики определения продолжительности подогрева полиэтиленовых труб в бухтах путем подачи нагретого воздуха вовнутрь трубы при различных низких климатических температурах окружающего воздуха.

Для сокращения продолжительности подогрева и рационального использования источников тепла необходимо укрыть бухту воздухонепроницаемым материалом (полиэтиленовой пленкой) и поддерживать температуру воздуха под укрытием свыше 20 °С и подавать подогретый до 60 °С воздух вовнутрь трубы в бухте. Естественно, продолжительность подогрева трубы будет сильно варьировать в зависимости от длины трубы, толщины стенки, температуры окружающей среды, скорости потока подаваемого воздуха, его температуры и т.д. На практике зачастую количество типоразмеров подогреваемых труб весьма ограничено, скорости потоков подаваемого воздуха постоянны. В связи с этим, в работе рассматривается задача расчетно-экспериментального определения продолжительность подогрева трубы заданного диаметра потоком нагретого воздуха с заданной скоростью.

Процесс подогрева трубы описывается системой уравнений нестационарного теплообмена при турбулентном течении подогретого воздуха в круглой трубе. Параметры математической модели – толщину ламинарного слоя и коэффициент турбулентной теплопроводности определялся на основе минимизации функционала, характеризующего меру уклонения расчетных и экспериментальных температур.

В эксперименте подогрев трубы в бухте осуществлялся под укрытием с температурой 15 °С. Температура подаваемого нагретого воздуха равна 54 °С, окружающего воздуха - минус 25°С. Диаметр трубы составлял 90 мм, длина – 100 м. Скорость потока подаваемого воздуха равна 16 м/с. Задача решалась методом конечных разностей с использованием расщепления по пространственным переменным и физическим процессам. Расчетами показано, что продолжительность подогрева, определяемое временем необходимым для достижения в стенке на конце трубы температуры 15 °С, составляет 51 мин. Приводятся результаты сопоставления расчетных и экспериментальных температурных данных, подтверждающих эффективность предлагаемой методики расчетно-экспериментального определения продолжительности подогрева.

При предположении, что структура турбулентного потока при изменении температуры стенки трубы сильно не изменяется, математическая модель с найденными параметрами (толщина ламинарного слоя и коэффициент турбулентной теплопроводности) может быть использована для прогнозирования продолжительности подогрева трубы в бухте при различных температурах окружающего воздуха. При изменении скорости потока расчетно-экспериментальным путем необходимо определить параметры модели. Предлагаемый подход приближенного расчета изменения температуры стенки труб при вынужденном течении

воздуха в круглой трубе может быть использован для расчета продолжительности подогрева полиэтиленовых труб различного типоразмера при определении параметров математической модели путем сопоставления расчетных и экспериментальных температурных данных.

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ВСТЫК ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Аммосова О.А., Старостин Н.П.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, д. 20, ул. Автодорожная, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, e-mail: nikstar56@mail.ru

Контактную тепловую сварку полиэтиленовых труб встык рекомендуется проводить при температурах окружающего воздуха не ниже минус 15 °С, что ограничивает ее использование в регионах холодного климата. При температурах окружающего воздуха ниже рекомендуемых сварку проводят в отапливаемых легких конструкциях. Однако такая сварка связана с большими энергетическими, непроизводительными затратами и длительной подготовкой, что недопустимо в аварийных ситуациях и проведении сварочных работ большого объема. Данная работа посвящена разработке способа оперативной сварки полиэтиленовых труб в зимних условиях без строительства теплых укрытий на основе регулирования теплового процесса сварки. Особенность фазового перехода в полимерах заключается в фазовом превращении кристалл-расплав не при строго определенной температуре, как это свойственно низкомолекулярным однокомпонентным системам, а в интервале температур. Тепловой процесс сварки полиэтиленовых труб встык моделируется с учетом фазового перехода в интервале температур и теплового воздействия грата на процесс охлаждения сварного соединения. Для снижения в сварном соединении температурных напряжений, необходимо перед проведением сварки предварительно подогреть концы свариваемых труб на длину вылета, равную пятикратной толщине стенки трубы, поскольку температурные напряжения, обусловленные сваркой, исчезают на таком удалении от стыка.

Предварительный подогрев свариваемых концов труб осуществляется специальным нагревательным инструментом, температура которого не превышает 60 °С и гарантированно не допускает изменения в структуре материала трубы. Инструмент позволяет подогревать внешнюю и внутреннюю поверхности стенки трубы. Предложена математическая модель теплового процесса при предварительном подогреве и сварке, которая учитывает теплофизические характеристики материала труб, геометрические размеры, формоизменение материала труб, температуру окружающего воздуха, технологические параметры. При подогреве инструментом через определенное время температура в стенке трубы становится равной температуре инструмента по толщине и по длине подогреваемого участка трубы. Для удаления инструмента предварительного подогрева и приведения труб в контакт с другим нагревательным инструментом необходимо некоторое время, за которое прогретая часть остывает. Продолжительность подогрева выбирается таким образом, чтобы распределение температуры стенки трубы стало неоднородным по радиальной переменной. Такой прием позволяет сделать достаточно длительную паузу для обеспечения более однородного распределения температуры в допустимом для сварки диапазоне, т.е. осуществления выравнивания температур путем естественного охлаждения. Расчетами найдена продолжительность подогрева равная 90 с для труб ПЭ 100 ГАЗ SDR 9 110×12,3 при температуре окружающего воздуха -40 °С. Продолжительность паузы (выравнивания) при этом составляет 190 секунд. После подогрева и выравнивания проводится оплавление торцов свариваемых труб нагревательным устройством с температурой 220 °С. После оплавления (нагрева) кромок свариваемых труб следует этап осадки, являющийся наиболее важным процессом, формирующим сварное соединение. При осадке свариваемые детали оплавленными поверхностями сближаются под давлением. Так как скорость охлаждения увеличивается с понижением температуры ОВ, предлагается использование цилиндрической камеры. Размеры камеры определяются на основе теоретического моделирования процесса охлаждения сварного соединения с теплоизоляционной камерой из условия обеспечения допустимой скорости охлаждения. Характерные зависимости температуры от времени при охлаждении сварного соединения в теплоизоляционной камере при различных температурах воздуха лежат между предельными кривыми, полученными при допустимых температурах воздуха.

Таким образом, вычислительными экспериментами показана возможность регулирования температурным режимом при сварке в условиях низких температурах окружающего воздуха и обеспечения в зоне термического влияния такого же изменения температурного поля, что и при допустимых температурах окружающего воздуха.

ПОЛЗУЧЕСТЬ И РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ПРИ ЕГО ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ДВУМЯ ЦИЛИНДРАМИ

Ковтанюк Л.В.[1], Панченко Г.Л.[2,3]

[1]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, д. 5, ул. Радио, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация, e-mail: lk@iacp.dvo.ru*

[2]*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, д. 1, ул. Металлургов, г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация*

[3]*Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, д. 41, ул. Гоголя, г. Владивосток, 690014, Российская Федерация, e-mail: panchenko.21@yandex.ru*

Целью работы является постановка и решение краевой задачи о деформировании несжимаемого материала с нелинейными упругими и вязкими свойствами, находящегося в зазоре между двумя жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями. Внутренняя поверхность движется прямолинейно, а внешняя поверхность закреплена. На граничных поверхностях выполняется условие прилипания.

Математическая модель процесса деформирования строится на основе теории больших упругопластических деформаций [1, 2], в которой обратимая и необратимая составляющие полных деформаций определяются дифференциальными уравнениями изменения. Основным преимуществом этой модели является следование требованиям классической теории упругопластичности, когда пластические деформации в областях упругого деформирования и при разгрузке изменяются так же, как и при жестком движении среды. Принятие упрощающей гипотезы о независимости термодинамического потенциала от пластических деформаций позволило получить решения ряда краевых задач об упругопластическом и упруговязкопластическом деформировании материалов, приобретающих большие деформации.

Считаем, что необратимые деформации накапливаются с начала процесса деформирования и связаны с ползучестью материала. Для задания соответствующего диссипативного механизма деформирования вводится термодинамический потенциал в форме степенного закона ползучести Нортона [3]. Учитывается также, что пластическое течение в материале не возникает, поэтому напряженное состояние не должно достигать поверхности текучести.

Рассматривается равноускоренное движение внутреннего цилиндра, движение его с постоянной скоростью и дальнейшее равнозамедленное движение до остановки. Рассчитаны напряжения, обратимые и необратимые деформации, перемещения, исследована релаксация напряжений после полной остановки цилиндра.

Для значительного формоизменения некоторых материалов используется способ холодной формовки в условиях ползучести [4]. Поэтому оказываются интересными постановки задач, когда при кинематическом воздействии на деформируемые материалы необратимые деформации накапливаются в условиях ползучести при низкой температуре. Данная задача является одним из таких примеров.

В дальнейшем планируется рассмотреть аналогичную краевую задачу, когда накопление необратимых деформаций происходит как вследствие ползучести, так и в процессе пластического течения в материале.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (код проекта 16-31-60017 мол_а_дк), Минобрнауки России в рамках государственного задания вузам на выполнение НИР (№ 2014/292), программы фундаментальных научных исследований «Дальний Восток» (0262-2015-0064, 0262-2015-0065).

Литература

1. Буренин А.А., Быковцев Г.И., Ковтанюк Л.В. Об одной простой модели для упругопластической среды при конечных деформациях // ДАН. – 1996. – Т. 347, № 2. – С. 199–201.

2. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В. Большие необратимые деформации и упругое последействие. Владивосток: Дальнаука. 2013. 312 с.

3. Norton, F.H. The creep steel of high temperature / F.H. Norton. – Y.: Mc Gpaw Hill, 1929. – 110 p.
4. Олейников А.И., Пекарш А.И. Интегрированное проектирование процессов изготовления монолитных панелей. М.: Эком. 2009. 109 с.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В МАТЕРИАЛАХ СО СТЕПЕННЫМ ОПРЕДЕЛЯЮЩИМ ЗАКОНОМ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ: АСИМПТОТИЧЕСКИЙ ПОДХОД И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ НА СОБСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Степанова Л.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), д. 34, Московское шоссе, г. Самара, 443086, Российская Федерация, e-mail: stepanovalv@samsu.ru,

В работе приводится асимптотическое и численное решения нелинейной задачи на собственные значения, следующей из проблемы определения напряженно-деформированного состояния в непосредственной окрестности вершины трещины в условиях смешанного нагружения в полном диапазоне смешанных форм деформирования от чистого сдвига до нормального отрыва в рамках предположения о реализации плоского напряженного состояния. Решение основано на разложении механических величин в ряд по малым степеням расстояния от кончика трещины в непосредственной окрестности вершины трещины. Разложение функции напряжений Эри в ряд по собственным функциям сводит анализ напряженно-деформированного состояния у вершины трещины к нелинейной задаче на собственные значения, одно из собственных значений которой хорошо известно и соответствует классической задаче нелинейной механики разрушения – задаче Хатчинсона – Райса – Розенгрена (ХРР). При исследовании смешанных форм деформирования, по сложившейся традиции, предполагается, что и при смешанном нагружении данное собственное значение является собственным значением задачи ХРР. Для случая плоского деформированного состояния данное предположение оказывается справедливым и подтверждается полученными решениями. Однако для плоского напряженного состояния гипотеза приводит к разрывному полю радиального напряжения на линии продолжения трещины, что не подтверждается известными конечно-элементными решениями, асимптотическими исследованиями и экспериментами в механике разрушения. В настоящей работе, основываясь на подходах асимптотической теории и численном анализе задачи, показано, что в условиях плоского напряженного состояния гипотеза о том, что при смешанном нагружении, собственное значение задачи совпадает с собственным значением задачи ХРР, нарушается и необходимо найти новые собственные значения, приводящие к непрерывным распределениям напряжений. Проведенный асимптотический анализ собственных значений, основанный на методах асимптотического анализа (метода искусственного малого параметра), позволил установить, что смешанное нагружение пластины с трещиной приводит к новому распределению напряжений, отличному от решения ХРР. В работе предложена процедура численного определения спектра собственных значений нелинейной задачи на собственные значения. С помощью численного решения нелинейной задачи на собственные значения найдены новые собственные значения, отвечающие непрерывным (на линии продолжении трещины) угловым распределениям радиального напряжения. Показано, что для частных случаев нормального отрыва и поперечного сдвига предложенная процедура приводит к хорошо известному решению ХРР. Таким образом, определение новой радиальной асимптотики полей напряжений и деформаций (или скоростей деформаций) сводится к нелинейным задачам на собственные значения, тщательное качественное исследование которых и составляет суть проблемы и обеспечивает решение задачи в целом. Полученное решение представляется полезным при построении автомодельных решений второго рода и связанных с ними нелинейных задач на собственные значения. Предлагаемый метод может быть использован для нахождения промежуточно-асимптотического автомодельного представления поля напряжений в связанной (ползучесть - поврежденность) задаче о трещине в условиях смешанного нагружения в материале со степенными определяющими уравнениями теории установившейся ползучести. Показано, что класс нелинейных задач на собственные значения, возникающих в нелинейной механике разрушения, представляется важным в связи с необходимостью построения многомасштабных, многоуровневых моделей, в соответствии с которыми в окрестности вершины трещины

необходимо вводить в рассмотрение совокупность областей с доминирующим действием различных асимптотик поля напряжений и проводить процедуру асимптотического сращивания получаемых решений. Аккуратное построение всех промежуточных зон с той или иной асимптотикой и проведение процедуры сращивания требует знания всего спектра собственных значений. Один из подходов к решению данной проблемы предложен в настоящей работе.

ИНФРАКРАСНОЕ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БИОИНЕРТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Шаркеев Ю.П., Вавилов В.П., Скрипняк В.А., Белявская О.А., Козулин А.А., Чулков А.О., Сороколетов А.Ю., Скрипняк В.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация, e-mail: sharkeev@ispms.tsc.ru, obel@ispms.tsc.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ), д. 30 пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация, e-mail: vavilov@tpu.ru, chulkovao@tpu.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ), д. 36 пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация, e-mail: skrp2006@yandex.ru, kozulyn@ftf.tsu.ru

Работа посвящена исследованию особенностей структуры биоинертных сплавов титана и циркония (ВТ1-0 и Э110) различного структурного состояния в процессе их деформирования и разрушения с применением метода инфракрасной термографии. Титан, благодаря высокой биосовместимости, нашел широкое распространение в имплантационной хирургии. Сплавы системы цирконий-ниобий также получили обоснование целесообразности их применения в медицине. Для повышения физико-механических свойств титановых и циркониевых сплавов применяется интенсивная пластическая деформация (ИПД), позволяющая формировать в сплавах наноструктурные (НС) или ультрамелкозернистые (УМЗ) состояния. Комплекс механических свойств УМЗ сплавов и качество получаемой из них продукции существенно зависит от процессов структурирования. В связи с этим исследованию механизмов разрушения НС и УМЗ сплавов с помощью структурно-чувствительных методов (внутреннее трение, диссипация энергии и др.) уделяется заметное внимание. В процессах пластической деформации и разрушения релаксация упругих напряжений вызывает локальное выделение тепла, что проявляется в изменениях температуры поверхности материала. Высокие чувствительность, скорость съемки современных инфракрасных (ИК) тепловизионных систем в сочетании с бесконтактным измерением температуры в режиме реального времени обусловили перспективность метода ИК термографии для исследования процессов накопления дефектов структуры, развития повреждаемости при механическом нагружении.

Цель исследования заключалась в установлении взаимосвязи структурных изменений, характеристик температурных полей и механических свойств материалов. Механические испытания выполнялись по схеме одноосного растяжения плоских образцов с постоянной скоростью деформации 0,01 $с^{-1}$ на сервогидравлическом стенде Instron VHS 40/50-20. Эволюцию температурного поля образцов в ходе растяжения фиксировали измерительной тепловизионной системой FLIR SC 7700M, модифицированной для исследования быстропротекающих тепловых процессов. Максимальная частота записи составляла 115 Гц при температурной чувствительности 20 мК и формате изображения 640x512. После испытаний образцов были проведены фрактографические исследования поверхностей их разрушения методом электронной растровой микроскопии на микроскопе LEO EVO 50.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что измельчение зерна приводит к существенному росту механических характеристик титана ВТ1-0 (на 78 %) и в несколько меньшей степени (на 46%) росту механических характеристик циркония Э110. УМЗ титановый сплав ВТ1-0 при растяжении обладает меньшей величиной предельной деформации до разрушения, по сравнению со значением для сплава в КК состоянии в 1,7 раза, а УМЗ циркониевый сплав Э110 - в 2,2 раза. ИК термограммы свидетельствуют о формировании неоднородного поля температуры в рабочей части деформируемых образцов, обусловленного развитием локализации пластического течения. Наибольшее повышение температуры имеет место в областях, прилегающих к границам магистральной трещины. Временные зависимости максимальной температуры испытуемого образца в процессе деформирования и разрушения

для каждого материала и структурного состояния имеют различия. Структура титана и циркония в КК и УМЗ состояниях влияет на характерные распределения температуры в деформируемых образцах, визуализируемые с помощью ИК термограмм. Отклонения от типичной структуры сплавов титана и циркония в КК и УМЗ состояниях вызывает ухудшение механических свойств (напряжение течения, предельная деформация до разрушения), характерных для определенного структурного состояния, и вносят изменения в типичные для каждого состояния ИК термограммы процессов деформации и разрушения.

Таким образом, структурные состояния сплавов титана и циркония (КК или УМЗ), а также дефектные отклонения от этих структур могут быть идентифицированы по типу термограмм, полученных методом ИК термографии на поверхности образцов в процессе деформирования.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований СО РАН III.23.2, 2013-2016 гг, Программы «Научного фонда им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 – 2016 гг., проект № 8.2.13.2015.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И УПРОЧНЕНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

Макаров А.В., Скорынина П.А., Юровских А.С., Осинцева А.Л.

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

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация

Эффективным методом повышения прочностных и трибологических свойств термически неупрочняемых аустенитных хромоникелевых сталей является наноструктурирующая фрикционная обработка скользящим индентором [1]. Важным в научном и практическом отношении представляется оптимизация условий проведения фрикционной обработки по критериям эффективного упрочнения и формирования требуемого структурно-фазового состояния градиентного поверхностного слоя при одновременном обеспечении высокого качества поверхности (отсутствие очагов адгезионного схватывания, низкая шероховатость).

Целью работы явилось изучение влияния на фазовый состав, структуру и микротвердость поверхностных слоев аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т следующих технологических параметров фрикционной обработки скользящими инденторами: материал индентора (микрокристаллический нитрид бора, твердый сплав ВК-8, синтетический и природный алмаз), вид смазочно-охлаждающей среды СОТС (СОЖ, воздух и аргон), нагрузка и кратность воздействия, температура нагружения в диапазоне от −196°С до +250°С. Учитывалось также качество формируемой при фрикционной обработке поверхности стали.

При оптимизации технологических параметров фрикционной обработки стали по критериям обеспечения интенсивного деформационного упрочнения и низкой шероховатости поверхности установлены преимущества использования индентора из синтетического алмаза и безокислительной среды аргона. Рентгеновский фазовый анализ поверхности стали показал, что с увеличением кратности фрикционного воздействия индентором из синтетического алмаза возрастает полнота деформационного превращения аустенита, а также уровень упрочнения и глубина упрочненного слоя. По мере увеличения количества сканирований индентором от 1 до 11 доля мартенсита деформации на поверхности аустенитной стали возрастает от 55 до 70 объем. %, а микротвердость повышается от HV0,025=560 до HV0,025=710. Полнота протекания деформационного мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения в поверхностном слое аустенитной стали 12Х18Н10Т в сильной степени зависит от температуры фрикционного нагружения: при увеличении температуры от –196°С до +250°С количество мартенсита деформации снижается от 100 об. % до 5 об. %. Однако при всех температурах фрикционного нагружения, несмотря на различный формируемый фазовый состав поверхностного слоя, достигаются близкие уровни деформационного упрочнения стали (HV0,025=555-575 после однократного сканирования при исходной микротвердости электрополированной поверхности аустенитной стали HV0,025=220).

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, в результате сильной пластической деформации, реализуемой при фрикционной обработке скользящим индентором из синтетического алмаза в безокислительных средах азота и аргона, в тонком (несколько мкм) поверхностном слое аустенитной нержавеющей стали формируются фрагментированные субмикрокристаллические (с размером кристаллитов более 100 нм) и нанокристаллические (с размерами кристаллитов менее 100 нм и большеугловыми границами) структуры α' мартенсита деформации (при температуре нагружения –196°С) и аустенита (при температуре нагружения +250°С), а также двухфазные мартенситно-аустенитные структуры (при температурах нагружения от –70 °С до +200 °С).

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-9-12-45) и государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 01201354598 при поддержке РФФИ, проект № 15-08-07947.

Литература

1. Макаров А.В., Скорынина П.А., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Саврай Р.А. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12Х18Н10Т наноструктурирующей фрикционной обработкой // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2015. – №4 (69). – С. 80–92.

ДВУХУРОВНЕВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ БОЛЬШИХ ГРАДИЕНТОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Янц А.Ю.[1], Трусов П.В.[2]

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия,
e-mail:[1] maximus5.59@gmail.com, [2]tpv@matmod.pstu.ac.ru

Рассмотрены вопросы построения двухуровневой модели, основанной на физической теории упруговязкопластичности, применительно к процессам неупругого деформирования поликристаллических материалов в случае больших градиентов перемещений.

Ключевые слова: физические теории пластичности, поликристалл, большие градиенты перемещений

Для получения поликристаллических металлов и сплавов с уникальными механическими свойствами в последние 15-20 лет широко используются процессы интенсивного пластического деформирования. Нагружение в таких процессах реализуется, как правило, по траекториям сложной геометрии при больших градиентах перемещений. Для описания таких процессов деформирования наиболее пригодной является теория упругопластических процессов А.А.Ильюшина, для идентификации параметров которой требуется проведение соответствующих экспериментов. Однако известные авторам эксперименты на сложное нагружение (двухзвенные траектории с изломом) тонкостенных трубчатых образцов ограничены малыми полными деформациями (на сдвиг – не более 5%). В этой связи актуальным является разработка и развитие существующих математических моделей для описания процессов интенсивного деформирования.

В настоящей работе для описания отмеченных выше процессов предлагается использовать двухуровневую конститутивную модель, основанную на упруговязкопластической физической теории пластичности [1].

Следует отметить, что моделирование процессов деформирования в случае больших градиентов перемещений связано с некоторыми сложностями, обусловленными наличием существенной геометрической нелинейности на обоих рассматриваемых масштабных уровнях. Для исключения влияния на реакцию материала жестких движений тела возникает необходимость введения подвижных системы координат, связанных с материалом и отвечающих за любые смещения тела как абсолютно твердые. Одним из требований, накладываемых на данные системы координат, должен быть ясный физический смысл мер деформаций и напряжений [2], определенных в них. Другим требованием является связь вводимой подвижной системы координат с материалом или с выделенными направлениями в нем [3]. В рамках данной модели предложено физически обоснованное разложение движение на квазитвердое и деформационное на обоих масштабных уровнях. С использованием данных разложений показан физический смысл неголономных мер деформированного состояния [2].

Предложена модификация [4] классического способа [5] построения образа процесса нагружения для случая больших градиентов перемещений [6]. Показана необходимость реализации нагружения именно для материала, квазитвердое движение которого определяется предлагаемым способом разложения движения. Также в рамках работы для мезоуровня (отдельного кристаллита) аналитически показано взаимно-однозначное соответствие закона Гука в скоростной форме и закона Гука в конечной формулировке при введении предлагаемого физически обоснованного разложения движения.

В ходе работы получены численные результаты нагружения представительного объема поликристалла стали 45 по траекториям с изломом в случае больших градиентов перемещений [7]. Полученные результаты свидетельствуют о хорошем согласовании с экспериментальными данными. Также получены результаты нагружения по различным траекториям в случае больших градиентов перемещений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№14-01-00069-а, №15-08-06866-а), гранта Правительства Российской Федерации (Постановление № 220 от 9 апреля 2010 г.), договор № 14.B25.310006 от 24 июня 2013 года.

Литература

1. Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Статистические модели// Физическая мезомеханика. – Томск: ИФПМ СО РАН. – 2011. – Т.14, №4. – С. 17–28.

2. Трусов П.В., Янц А.Ю. О физическом смысле неголономной меры деформации // Физическая мезомеханика. – Томск: ИФПМ СО РАН. – 2015. – Т. 18, №2. – С. 13–21.

3. Трусов П.В., Волегов П.С., Янц А.Ю., Двухуровневые модели поликристаллов: о разложении движения на макроуровне // Физическая мезомеханика. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2013. – Т. 16, №5. – С. 17–23.

4. Трусов П.В., Волегов П.С., Янц А.Ю., Двухуровневые модели поликристаллов: о независимости образа процесса нагружения представительного макрообъема // Физическая мезомеханика. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2013. – Т. 16, №6. – С. 33–41.

5. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. − М.: Изд. АН СССР. – 1963. – 272 с.

6. Трусов П.В., Волегов П.С., Янц А.Ю., Двухуровневые модели поликристаллов: приложение к оценке справедливости постулата изотропии Ильюшина в случае больших градиентов перемещений // Физическая мезомеханика. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2015. – Т. 18, №1. – С. 23–37.

7. Трусов П.В., Волегов П.С., Янц А.Ю., Двухуровневые модели поликристаллов: приложение к анализу сложного нагружения // Физическая мезомеханика. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2013. – Т. 16, № 6. – С. 43–50.

ТРЕНИЕ И ИЗНОС МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ, СОДЕРЖАЩИХ СИЛИКОНОВОЕ МАСЛО

Федоров А.Л.[1], Петрова П.Н.[1], Маркова М.А.[2]

[1]*ФГБУН «Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук», д. 20, ул. Автодорожная, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), 677007, Российская Федерация*
[2]*ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», д. 48, ул. Белинского, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), 677000, Российская Федерация*
e-mail: gelvirb@mail.ru

Цель: Исследование влияния силиконового масла (полидиметилсилоксана) на трение и износ пористого ПТФЭ.

Объекты и методы исследования. В качестве образцов для испытаний использован политетрафторэтилен (фторопласт-4) марки ПН (ГОСТ-10007-80) с пористой структурой.

В качестве пропитывающей жидкой смазки использован полидиметилсилоксан DOWCORNING 200 Fluid 50CS.

Пористость определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 18898-89.

Триботехнические характеристики (коэффициент трения, скорость массового изнашивания) определяли на машине трения ИИ-5018. Схема трения столбик-торец диска, прижимающая сила 134 Н (1,7 МПа), скорость скольжения – 0,5 м/с, путь трения – 5,5 км). Исследуемый образец цилиндр диаметром 10 и высотой 15 мм; контртело – диск диаметром 49 мм из стали 45 с твердостью 45–50 HRC.

Результаты исследования и их обсуждение. Для обеспечения введения жидкой смазки в объем композита использовали способ получения пористых заготовок (рис. 1.), в котором в роли порообразователя выступает хлорид натрия, впоследствии удаляемый из объема полимерной матрицы путем растворения водой. После вымывания соли полимерные пористые заготовки подвергались термообработке, после чего пропитывались полидиметилсилоксаном.

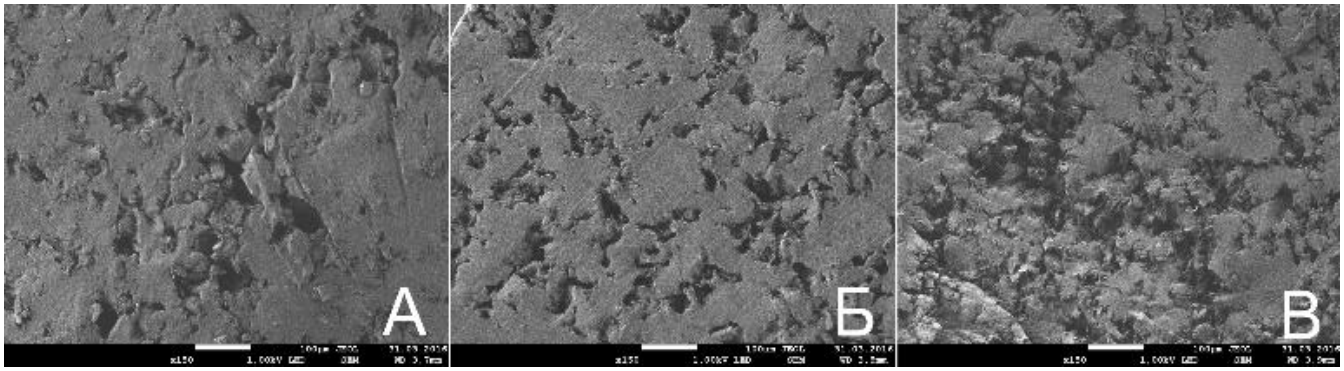


Рис. 1. Электронные микрофотографии срезов пористого ПТФЭ, полученных вымыванием образцов с различным содержанием соли: а) 20 %; б) 25 %; в) 30 % (увел. ×150)

Надо отметить, что вымывание соли у образцов с содержанием соли 20 мас. % происходит не полностью, при срезе обнаруживаются участки, в центре образца, где соль остается даже после многократных попыток вымывания. Это объясняется тем, что частицы соли при данном содержании находятся обособленно друг от друга и поэтому проникновение воды внутрь образца затруднено. При содержании соли в 25 и 30 мас. %, вымывание соли происходит полностью.

Результаты исследования триботехнических характеристик композитов на основе ПТФЭ и полидиметилсилоксана приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Триботехнические характеристики ПТФЭ в зависимости от содержания полидиметилсилоксана

Состав	C_{NaCl}, мас.%	$C_{масла}$, мас. %	*П, %*	*I, мг/ч*	*f*
ПТФЭ	-	-	6,4	420,5	0,16-0,18
	20	-	26,1	149,5	0,14-0,18
	25	-	30,4	-	-
	30	-	34,8	-	0,15-0,17
ПТФЭ + силиконовое масло	20	14,3	-	18,8	0,08-0,09
	25	23,9	-	13,2	0,04-0,05
	30	29,7	-	11,8	0,04-0,05

Примечание: C_{NaCl}- содержание соли в заготовках; $C_{масла}$- содержание масла; I – скорость массового изнашивания, *f* - коэффициент трения.

Из таблицы видно, что повышение концентрации хлорида натрия в полимерных заготовках приводит к повышению пористости композита. Повышение пористости способствует улучшению сорбции полидиметилсилоксана в объем композита, что в свою очередь приводит к повышению износостойкости в 35 раз и снижению коэффициента трения в 3,5 - 4 раза по сравнению с исходным полимером. Уменьшение коэффициента трения происходит за счет выдавливания полидиметилсилоксана из объема полимера на поверхность трения, благодаря чему реализуется режим трения со смазкой, что также способствует повышению износостойкости.

Заключение. Показано, что полидиметилсилоксан способствует снижению коэффициента трения композитов, а также снижению скорости массового изнашивания.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГЗ №11.512.2014/К МОН РФ

ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ КОРРОЗИОННОГО ПРОЦЕССА В РАЗЛИЧНЫХ АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ ПО ПОКАЗАНИЯМ РЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ КОРРОЗИИ

Муратов К.Р.[1], Новиков В.Ф.[1], Нерадовский Д.Ф.[1], Устинов В.П.[2]

[1]*ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация, e-mail: muratows@mail.ru*

[2]*ЗАО «Пургаз», д. 52, микрорайон 16, г. Губкинский, 629830, Российская Федерация, e-mail: zaopurgaz@purgaz.com*

Одним из наиболее распространенных и простых в реализации датчиков-свидетелей коррозии являются резистивные датчики, о степени коррозии которых судят по возрастанию их электрического сопротивления. Чувствительный элемент представляет собой пластину, проволоку или ленту из испытуемого металла.

В модели расчета коррозионной убыли металла по значению электросопротивления чувствительных элементов предполагается равномерная коррозия, которая в действительности такой не бывает. Это неизбежно приводит к появлению систематической погрешности.

В работе [1] была предложена модель учета неоднородности коррозии. Наиболее важным результатом этой работы является возможность выполнения дистанционной оценки неоднородности коррозии, что позволит предсказывать максимальную локальную скорость коррозии. Такая возможность основана на зависимости электросопротивления не только от средней скорости коррозии $\boldsymbol{v}$, но и от коэффициента неравномерности $\boldsymbol{\psi}$, то есть $\boldsymbol{R = f(v,\psi)}$. Используя как минимум два датчика, имеющих различную геометрию можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} \boldsymbol{R_1 = f_1(v,\psi)} \\ \boldsymbol{R_2 = f_2(v,\psi)} \end{cases}. \quad (1)$$

Решение этой системы, в идеале, позволит определить оба показателя коррозионного процесса. Однако экспериментального подтверждения предлагаемой идеи не было выполнено. **Целью исследования** явилась экспериментальная проверка возможности дистанционной оценки неравномерности коррозии.

Экспериментальные исследования выполнены на стальных ленточных образцах с тремя различными вариациями их поперечной геометрии (толщина, ширина). По три датчика различной геометрии размещали в трех типах грунтов: песок, торф и чернозем. Периодически выполнялись измерения электросопротивления. После испытаний датчики были извлечены, очищены и гравиметрически определена убыль металла.

На рисунке 1 сопоставлены средние значения убыли толщины образцов, рассчитанные по изменениям электросопротивления $\boldsymbol{\Delta h_R}$ и массы $\boldsymbol{\Delta h_m}$. Штрихпунктирной линией обозначена идеальная зависимость этих параметров ($\boldsymbol{\Delta h_R}$=$\boldsymbol{\Delta h_m}$). Значения $\boldsymbol{\Delta h_R}$, полученные согласно равномерной модели, дают завышенные значения. Для проверки предлагаемой [1] статистической модели были получены значения $\boldsymbol{\Delta h_R}$ и $\boldsymbol{\psi}$ путем решения систем уравнений (1). Результаты этих решений представлены в виде горизонтальных жирных полок, на которые указывают пунктирные стрелки из точек, значения сопротивлений которых были заложены в систему уравнений. Полученные предлагаемым способом значения близки к реальным, причем они получены без предварительной оценки неоднородности, то есть бесконтактно! Для образцов в песке решением системы (1) получено два значения **Δh**, одно из которых выше реального, другое ниже. Среднее их значение дает еще более точную оценку коррозионной убыли. При использовании бóльшего числа образцов, исключении ряда факторов вносящих погрешности можно, по крайней мере для песчаной среды, выполнять дистанционную оценку коррозии с высокой достоверностью.

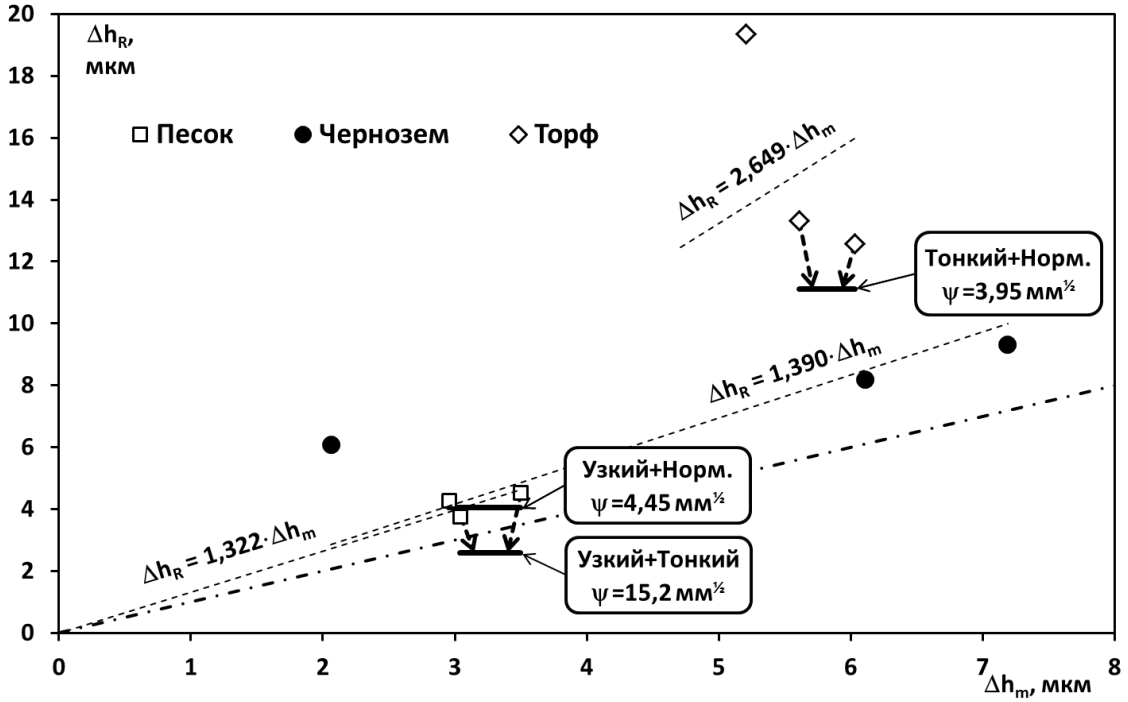


Рис. 1. Сопоставление средней коррозионной убыли толщины, рассчитанной по электросопротивлению и массе

К сожалению, получить решение удалось только для трех пар возможных значений электросопротивлений (остальные пары не имели решения), что является результатом, как методических погрешностей эксперимента, так и неконтролируемых случайных факторов.

По результатам работы можно сделать **вывод** о том, что использование предлагаемой в работе [1] модели учета неравномерности коррозии позволяет получать более достоверную информацию об убыли металла образца-свидетеля, а также бесконтактно получать информацию о степени неоднородности процесса.

Литература

1. Муратов К.Р., Рышков В.А. Оценка влияния неоднородности коррозионного процесса по показаниям резистивных датчиков - свидетелей коррозии // Датчики и системы. 2010. № 10. С. 20–23.

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ДИСКРЕТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Попков А.А.

Сибирский государственный университет путей сообщения, д. 191, ул. Дуси Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация, e-mail: zabagy@gmail.com

При акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележек грузовых вагонов, конструктивно отличающихся значительным количеством технологических отверстий и элементов переменной толщины, сигналы акустической эмиссии представляют собой стохастические сигналы сложной формы. Координаты преобразователей акустической эмиссии оказывают существенное влияние на точность локации и на параметры регистрируемых сигналов. **Актуальность** работы состоит в необходимости создания и совершенствования алгоритмов и методик обработки и регистрации акустико-эмиссионных сигналов и оценки их параметров. Фазовый метод локации менее подвержен влиянию неопределенности скорости распространения акустического импульса на точность локации источника. **Целью работы** является оценка достоверности фазовых методов локации источников акустико-эмиссионных сигналов.

Для исследования использовались модели датчиков, включающие в себя три пьезоэлектрических преобразователя, расположенные в вершине равностороннего треугольника (рис. 1). Для обеспечения однозначности результатов фазового метода локации, длина стороны треугольника ограничена длиной волны λ акустико-эмиссионного импульса. Были проведены эксперименты на стальном листе размерами 500x500x8 мм из стали Ст3пс. Акустико-эмиссионные импульсы возбуждались источником Су-Нильсена. Расстояние между центрами преобразователей составляло 25 мм, что удовлетворяло условиям моделирования. Сигналы регистрировались цифровой акустико-эмиссионной диагностической системой СЦАД 16.03 (ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», СГУПС, Новосибирск) с коэффициентом усиления 2000 и дискретностью отсчета АЦП 0,5 мкс.

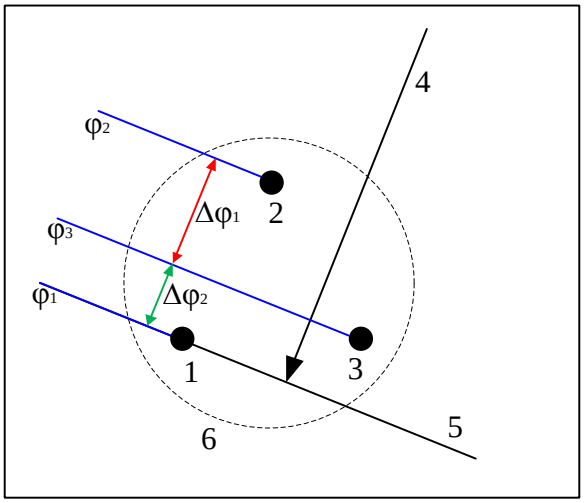


Рис. 1. Схема прохождения акустической волны через модель преобразователя. На рисунке цифрами обозначены: 1, 2, 3 – пьезоэлектрические преобразователи №1, №2, №3 соответственно; 4 – направление волны; 5 – фронт волны; 6 – корпус датчика; φ_1, φ_2, φ_3 – фаза зарегистрированной волны; $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ – разность фаз.

Угол α между лучом направления следования волны и прямой, соединяющей преобразователи №1 и №3 (рисунок 1) определялся по формуле:

$$\angle\alpha = 90^\circ - arcctg\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{\Delta\varphi 2}{\Delta\varphi 1} + \frac{1}{2}\right)\right) + \pi \cdot n.$$

Для рассчитанной модели фазовой локации с использованием близкорасположенных преобразователей, угол распространения волны пропорционален отношению разности фаз между преобразователями и не зависит от скорости распространения и частоты волны. При-

менение фазовой локации источников акустической эмиссии близкорасположенными относительно длины волны преобразователями позволяет определить направления источника акустической эмиссии. В результате экспериментальных исследований для разработанной модели удалось определить направление источника акустической эмиссии с погрешностью в 3,5º.

Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др.Вибродиагностика. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.: ил.

2. Акустико-эмиссионный контроль качества сварного шва в процессе остывания, Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кабанов С.И., Канифадин К.В., Рамазанов И.С., Бехер С.А. Контроль. Диагностика. 2009. № 3. С. 61–67.

3. Методика определения координат дефектов при акустико-эмиссионном контроле свободных колец подшипников, Степанова Л.Н., Бехер С.А., Тенитилов Е.С. Контроль. Диагностика. 2010. № 4. С. 61–65.

НЕОБРАТИМЫЕ И КВАЗИОБРАТИМЫЕ МАГНИТОУПРУГИЕ ЯВЛЕНИЯ В ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ

Новиков В.Ф., Муратов К.Р., Нерадовский Д.Ф.

ФГБОУ ВО Тюменский государственный нефтегазовый университет, д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация, e-mail: denner81@mail.ru

Известно [1], что при нагружении образцов остаточная намагниченность изменяется необратимо, а при приложении чередующихся растягивающих и сжимающих напряжений к остаточно намагниченному магнетику наблюдается установившееся изменение остаточной намагниченности – пьезомагнитный эффект. В [2] рассматривается связь между пьезомагнитным эффектом и основными магнитными свойствами характеризующими магнетик, такими как магнитострикция, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила. Показано, что магнитоупругое установившееся изменение остаточной намагниченности существенным образом зависит от режимов термообработки, а значит и от структуры стали. Установлено [2], что величина пьезоэффекта в ряде случаев является более структурно чувствительным параметром, чем например коэрцитивная сила, поэтому исследование пьезоэффекта является важной практической задачей для применения в структуроскопии ферромагнетиков. В данной работе рассматриваются магнитоупругие явления в стали 40Х13.

Для исследования магнитоупругого размагничивания и пьезомагнитного эффекта были сняты петли магнитоупруго гистерезиса, полученные при приложении циклических сжимающих и растягивающих напряжений к образцам стали 40Х13 в остаточно намагниченном состоянии, отпущенных при различной температуре отпуска. В качестве измеряемых параметров использовались ΔM – величина необратимого магнитоупругого размагничивания, δM^* – величина необратимого размагничивания после многократных циклических нагрузках, δM – величина квазиобратимого пьезомагнитного эффекта, а также $dM/d\sigma$ – тангенс угла наклона между прямой, соединяющей вершины петель, в области квазиобратимого пьезомагнитного эффекта, и осью напряжений.

Обнаружено, что величина необратимого магнитоупругого размагничивания в диапазоне температур отпуска (450-530)^{0}С практически не изменяется, начиная с температуры порядка 530^{0}С испытывает резкий рост (>100%) и далее до 600^{0}С изменяется незначительно. Сравнение δM^* и δM в зависимости от температуры отпуска показывает, что в окрестности температуры 550^{0}С для первой величины достигается максимальное, а для второй, минимальное значения. Величина магнитоупругой чувствительности $dM/d\sigma$ образцов в диапазоне температур (450-530)^{0}С изменяется незначительно, а начиная с температуры отпуска 530^{0}С резко убывает. При температуре 550^{0}С наблюдается уменьшение остаточной намагниченности с увеличением растягивающих напряжений (отрицательный пьезомагнитный эффект). При температуре 600^{0}С магнитоупругая чувствительность вновь принимает положительное значение. В [3] приведены зависимости коэрцитивной силы для высокохромистых сталей от температур отпуска в рассматриваемом диапазоне. Известно [4], что в диапазоне температур от (450-600)^{0}С наблюдается интенсивный распад мартенситной фазы, приводящий к снижению уровня микронапряжений в матрице, и образование карбидной фазы. Таким образом, структурные изменения, происходящие в стали, проявляются в магнитоупругом эффекте существенно сильнее, чем изменение H_c, что говорит о высокой структурной чувствительности эффекта магнитоупругого размагничивания.

Чувствительность тензорезистивного преобразователя в пределах упругих деформаций составляет $\Delta R/R_0 \sim 10^{-3}$.Показано, что чувствительность необратимого магнитоупругого преобразователя полученного из образцов при температуре отпуска 550 °С составляет $\Delta M/M_0 \sim 10^{-1}$, а чувствительность квазиобратимого пьезоэффекта $\delta M/M_0 \sim 10^{-2}$.

Литература

1. Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. К природе пьезомагнитного эффекта остаточно намагниченного состояния магнетика //Изв. вуз. Нефть и газ. – 1998. – №4. – С. 92–102.

2. Новиков В.Ф. Бахарев М.С. Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках]. Изд-во «Вектор Бук». Тюмень. 2001г. с. 219.

3. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург : УрО РАН, 2005.

4. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986, с. 544.

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПЛЁНОК С ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Кудюков Е.В., Балымов К.Г., Лепаловский В.Н., Васьковский В.О.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, д. 51, пр. Ленина, г. Екатеринбург, 620083, Российская Федерация, e-mail: k.g.balymov@urfu.ru

Наряду с общепринятыми способами регистрация деформаций и силовых воздействий, на основе тензорезистивных и пьезорезистивных принципов, могут быть востребованы тонкоплёночные материалы обладающие сочетанием таких свойств как магнитострикция и анизотропия магнитосопротивления (АМС). Указанными свойствами характеризуется, например, сплав FeNi [1], традиционно используемый в магнитной сенсорике. Проблема магнитного гистерезиса, наблюдаемого в плёнках FeNi при циклических упругих деформациях, может быть минимизирована подмагничиванием за счёт явления однонаправленной анизотропии [2], реализуемой в обменно-связанных плёнках типа ферромагнетик/антиферромагнетик. Данная работа посвящена исследованию возможности применения магнитосопротивления плёнок типа FeNi/FeMn с однонаправленной анизотропией для регистрации упругой деформации.

Экспериментальная работа выполнена на плёночных образцах, полученных методом магнетронного распыления на стеклянные подложки в присутствии постоянного магнитного поля, индуцирующего ось обменного смещения (ООС). Исследования произведены на многослойных плёнках Ta/$Fe_{20}Ni_{80}$/FeMn/$Fe_{10}Ni_{90}$ и Ta/$Fe_{20}Ni_{80}$/FeMn/$Fe_{20}Ni_{80}$, в которых группа слоёв Ta/$Fe_{20}Ni_{80}$/FeMn создавала обменное смещение в функциональном слое $Fe_{10}Ni_{90}$ ($Fe_{20}Ni_{80}$), толщина которого варьировалась от 20 до 80 нм. Деформация образцов осуществлялась микрометрическим транслятором, путём контролируемого прогиба образцов. Измерение электросопротивления производилось стандартной 4-х зондовой методикой в магнитном поле напряжённостью до 160 Э.

На рис. 1 представлены типичные магниторезистивные петли $R(H)$ плёнки Ta/$Fe_{20}Ni_{80}$/FeMn/$Fe_{10}Ni_{90}$(40 нм), подвергнутой различной упругой деформации. Характерное смещение магниторезистивных петель по оси магнитного поля свидетельствует о присутствии однонаправленной анизотропии функционального слоя. Кроме того, $R(H)$ петли демонстрируют достаточно высокую чувствительность электросопротивления к деформации, а также изменение этой чувствительности в зависимости от величины приложенного магнитного поля H_o вдоль ООС.

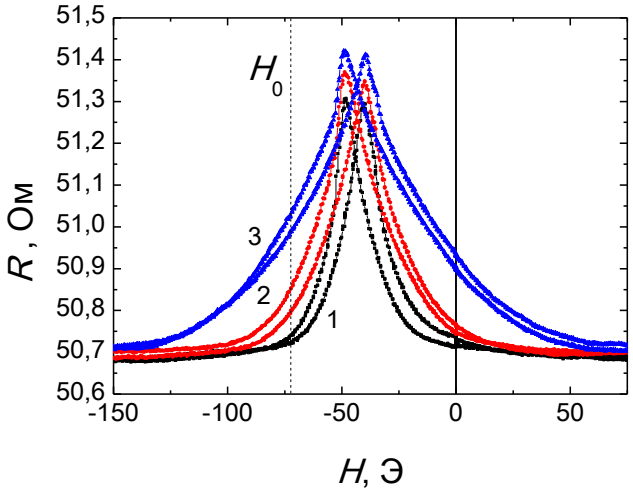


Рис. 1. Зависимости электросопротивления от напряженности магнитного поля в плёнке Ta/$Fe_{20}Ni_{80}$/FeMn/$Fe_{10}Ni_{90}$ в исходном состоянии (кривая 1) и подвергнутой различному относительному удлинению: 0,02% (кривая 2) и 0,05% (кривая 3)

По полученным данным проведена оптимизация геометрии эксперимента, толщины функционального слоя, величины внешнего магнитного поля H_o с целью получения при цик-

лической деформации наибольшего *ΔR/R*-эффекта при минимальном гистерезисе в изменении электросопротивления. Показано, что наилучшим образом указанным условиям удовлетворяют образцы с толщиной функционального слоя 80 нм, вырезанные перпендикулярно ООС и подмагниченные перпендикулярно ООС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект RFMEFI57815X0125.

Литература

1. Elmrabat B. and Popma Th.J.A., JMMM, 87, 114–122, (1990);
2. Svalov A.V., Kurlyandskaya G.V, et al., Superlattices and Microstructures, 83, 216–223, (2015).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ ПРУТКОВОГО ПРОКАТА

Муравьева О.В., Муравьев В.В., Габбасова М.А., Петров К.В., Зорин В.А.

ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», д. 7, ул. Студенческая, г. Ижевск, 426069, Российская Федерация, e-mail: vmuraviev@mail.ru

Современные физические методы и средства неразрушающего контроля широко используются при решении задач оперативной оценки структуры, напряженно-деформированного состояния, анизотропии, упругих и прочностных свойств материалов и изделий. Одними из наиболее успешно применяемых являются акустические методы. Использование при контроле бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей позволяет отстроиться от качества акустического контакта, за счет чего повысить точность измерения параметров скорости и затухания акустических волн, и использовать в качестве дополнительного информативного параметра эффективность ЭМА-преобразования.

В работе представлены возможности применения разработанных авторами методов акустической структуроскопии с использованием проходных и накладных ЭМА-преобразователей объемных и рэлеевских волн для оценки влияния структуры и напряженно-деформированного состояния прутков из ферромагнитных и неферромагнитных материалов различного назначения (рессорно-пружинные, конструкционные, инструментальные и др.) на информативные параметры акустических волн.

При исследованиях прутков применен зеркально-теневой метод на многократных отражениях с использованием специализированных ЭМА-преобразователей проходного типа поперечных и продольных волн радиальных направлений и ЭМА-преобразователей накладного типа рэлеевских волн по периметру прутка. Прием и регистрация принятых сигналов производилась с помощью аналого-цифрового преобразования с высокой частотой дискретизации (100 МГц) и специализированного программного обеспечения «ПРИНЦ». Возможность получения серии многократных отражений и разработанные авторами специальные методы обработки осциллограмм (метод корреляционного, спектрального и вероятностно-статистического анализа) обеспечивают высокую точность определения основных информативных параметров - скорость и затухание продольных, поперечных, рэлеевских волн, амплитуды сигналов, характеризующие эффективность ЭМА-преобразования.

При оценке упругих модулей металла прутков: модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, использовалась их функциональная связь со скоростями распространения объемных (продольных и поперечных) и рэлеевских волн в объекте.

Для оценки влияния структурных изменений в пружинно-рессорной стали на измеряемые характеристики акустических волн использованы образцы пруткового проката из конструкционной рессорно-пружинной стали марки 60С2А, используемой при изготовлении железнодорожных пружин в состоянии поставки и при отработке операций технологического цикла на стадии термической обработки в ООО «НПЦ «Пружина». Показано, что скорости распространения продольных и поперечных волн в прутках снижаются с увеличением неравновесности структурного состояния и соответственно внутренних напряжений, полученных с помощью разных режимов термической обработки; по длине образцов в разных сечениях прутка скорость волн неодинакова, что связано с отличием в структурах вследствие разной скорости охлаждения при закалке; в зависимости от направления распространения по диаметру прутка имеет место анизотропия по скорости, максимальная для образцов с неравновесной структурой, что объясняется как фактором структурной анизотропии, так и возможными отклонениями профиля при прокатке; наибольшее затухание с возможностью трансформации волн наблюдается в образцах с неравновесной структурой, характеризующейся наряду с мартенситом наличием продуктов немартенситного распада (троостита, сорбита) и обезуглероженного слоя с крупнозернистым ферритом.

Использование в качестве информативных параметров волн Рэлея дает возможность получать информацию о приповерхностном слое объекта контроля. В частности, для нерав-

новесных структур и для образцов с обезуглероженным поверхностным слоем скорость рэлеевских волн минимальна, при этом наблюдается корреляция скорости с глубиной обезуглероженного слоя. Структуры исследуемых образцов в существенной мере влияют на затухание акустических волн, обусловленное преимущественно рассеянием на неоднородностях структуры, а также на эффективность ЭМА-преобразования. Исследовано влияние растягивающих механических напряжений на основные параметры акустических волн, подтвердившее чувствительность метода к малым структурным изменениям, упругим свойствам и напряженному состоянию.

Таким образом, ЭМА-метод, благодаря возможности получения серий многократных отражений, насчитывающих десятки ультразвуковых импульсов, является тонким инструментом при оценке упругих свойств, качества термической обработки, структурного и напряженно-деформированного состояния.

Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ ДВУХФАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ СПЛОШНЫМИ И ПОЛЫМИ АНИЗОТРОПНЫМИ ВОЛОКНАМИ ИЛИ СФЕРИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация
e-mail: zav@pstu.ru, sokolkin@pstu.ru, mr_aa@mail.ru

Современные функциональные двухфазные композиты изготавливаются совмещением анизотропных арамидных, базальтовых или керамических волокон, минеральных сферических включений с полиэфирными связующими, наполненными минеральными мраморной, базальтовой или гранитной мукой, или матрицами на основе керамики или терморасширенного графита. Это повышает температуру эксплуатации элементов конструкций из этих материалов, износостойкость, способность работать в агрессивных средах, приводит к необходимости учета анизотропии свойств фаз при построении моделей.

Полидисперсная модель З. Хашина позволяет с хорошей инженерной точностью прогнозировать эффективные упругие и теплофизические свойства широкого класса двухфазных композитов с изотропными элементами структуры. Получены аналитические выражения для эффективных модулей объемного сжатия дисперсно-упрочненных материалов, изотропные матрицы которых армированы трансверсально-изотропными полыми или сплошными сферами различного диаметра, а на межфазных поверхностях выполняются условия идеального сопряжения [1, 2]. Спрогнозированы эффективные характеристики полиэфирного связующего, наполненной мраморной или диабазовой мукой, а также полимербетонов со сплошными сферическими анизотропными мраморными, диабазовыми и гранитными включениями произвольного размера. Показано, что при использовании «изотропного приближения» для прогнозирования эффективных упругих модулей материалов с анизотропными фазами, будут получаться верхние оценки, существенно отличающиеся от экспериментальных данных. Это позволяет сделать вывод о том, что учет анизотропии является одним из способов уточненного описания результатов механических испытаний [2, 3]. Выявленные закономерности изменения эффективных характеристик позволили дать рекомендации по составу полимербетона, который используется для изготовления конструкций ответственного назначения (контейнеры для длительного хранения высоко-агрессивных и реакционно-способных твердых и жидких сред).

Рассматривая биологические костные ткани, состоящие из высокомодульных и высокопрочных неорганических волокон из кристаллов гидроксилапатита и матрицы в виде органических и коллагеновых волокон как двухфазный композит, получены аналитические выражения для эффективных модулей объемного сжатия таких материалов при плоской деформации. Спрогнозированы изменения эффективных модулей с учетом возрастной внутренней перестройкой структуры костной ткани, связанной с увеличением объемной пористости [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ–Урал № 16–41–590396).

Литература

1. Зайцев А.В., Фукалов А.А. Эффективные модули объемного сжатия дисперсно-упрочненных композитов со сплошными и полыми анизотропными сферическими включениями // Вестник ПНИПУ. Механика. 2010. № 4. С. 46–54.

2. Зайцев А.В., Новгородова А.В., Федоров Д.И. Прогнозирование эффективных упругих модулей двухфазных композитов на основе термореактивных смол с минеральным наполнителем // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2005. № 25. С. 62–68.

3. Зайцев А.В., Кислицын А.В., Кутергин А.В. Фукалов А.А. Распределение напряжений в поперечных сечениях контейнеров из стеклопластика и полимербетона, используемых для длительного хранения высокоагрессивных сред // Известия Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14, № 4–5. С. 1230–1234.

4. Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А. Эффективные модули объемного сжатия при плоской деформации двухфазных однонаправленно армированных композитов с анизотропными полыми и сплошными волокнами // Вестник ПНИПУ. Механика. 2011. № 4. С. 37–48.

ОЦЕНКА НАЧАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МОНОЛИТНОЙ КРЕПИ СФЕРИЧЕСКОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ В МАССИВЕ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Зайцев А.В., Фукалов А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: zav@pstu.ru, mr_aa@mail.ru

Подкрепление является необходимым условием эксплуатации сферических горных выработок. Материал, из которого изготавливают крепи (массивные сооружения, предназначенные для обеспечения безопасности труда, сохранности находящегося внутри сырья и оборудования), не является изотропным, поэтому важным и актуальным является получение новых аналитических решений краевых задач о равновесии толстостенных составных анизотропных упругих сфер, находящихся под действием равномерного внутреннего давления в поле гравитационных сил, и разработка на основе этих решений инженерных методик уточненного прочностного анализа элементов конструкций и сооружений, имеющих аналогичную геометрию и граничные условия. Кроме того, эти решения могут использоваться для идентификации материальных постоянных и функций анизотропных материалов и при тестировании алгоритмов, реализующих численные методы, а также при отработке методик экспериментов с «тяжелыми» телами простейшей геометрии.

Рассмотрев монолитную крепь горной выработки и окружающий породный массив, как единую механическую систему (предполагая, идеальное сопряжение по сферической поверхности контакта) и, применив метод, основанный на разложении компонент вектора перемещений по окружной и радиальной координате в ряды по полиномам Лежандра и обобщенные степенные ряды [1–3], получены новые точные аналитические решения задач о равновесии «тяжелых» составных сфер, находящихся под действием внутреннего давления, и жестко закрепленной или закрепленной только в радиальном направлении (при наличии скольжения без трения) внешней поверхностью. Из полученных решений в частном случае следуют выражения для перемещений, напряжений и деформаций в точках полых и составных изотропных сфер, находящихся в поле гравитационных сил, на внутренней и внешней поверхностях которых заданы аналогичные граничные условия [4, 5]. В качестве примера была рассмотрена монолитная железобетонная крепь сферической горной выработки, окруженная массивом осадочных пород [2, 3]. Полученные аналитические решения позволили проанализировать влияние геометрии сооружений и свойств железобетона на распределения инвариантов тензора напряжений в поперечных сечениях монолитных крепей сферических горных выработок, учитывая различные условия совместного деформирования с окружающим массивом осадочных горных пород [3], а также провести оценку начальной прочности на основе многокритериального подхода, описывающего различные механизмы разрушения, и определить области, где разрушение может быть инициировано.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ–Урал № 14–01–96029).

Литература

1. Зайцев А.В., Фукалов А.А. Упругое равновесие тяжелой трансверсально-изотропной толстостенной сферы с жестко закрепленной внутренней поверхностью // Вестник Самарского гос. технического ун-та. Серия: Физико-математические науки. 2010. № 5(21). С. 85–95.

2. Фукалов А.А., Кутергин А.В. Точные аналитические решения задач о равновесии упругих анизотропных тяжелых тел с центральной и осевой симметрией и их приложения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4–4. С. 1831–1833.

3. Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А. Механизмы начального разрушения железобетонной крепи сферической горной выработки в массиве осадочных пород // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. № 4. С. 59–74.

4. Кожевникова Л.Л., Кузнецов Г.Б., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н. Аналитическое исследование упругого равновесия полой сферы, жестко закрепленной по внешнему контуру // Пробл. прочности. 1974. № 9. С. 20–23.

5. Кузнецов Г.Б. Упругость, вязкоупругость и длительная прочность цилиндрических и сферических тел. М.: Наука, 1979.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ, УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОМ, НА ОСНОВЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Шардаков И.Н., Быков А.А., Шестаков А.П., Глот И.О.

Институт механики сплошных сред УрО РАН

д. 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация, e-mail: shardakov@icmm.ru

Железобетонные элементы конструкций часто являются несущими элементами, отвечающими за целостность и устойчивость конструкции. В настоящее время получила широкое распространение технология усиления железобетонных конструкций композиционными материалами. Актуально исследование деформационного поведения и несущей способности железобетонных балок, усиленных углепластиковыми лентами. Остается актуальной разработка методов регистрации отслоения углепластика от бетонного основания.

Одним из перспективных методов исследования деформационных процессов в железобетонных балках, усиленных углепластиком, является инфракрасная термография. Возникновение несплошностей в теле многослойной конструкции вызывает изменение ее теплопроводности и искажает температурное поле, формирующееся в ней в процессе нагрева и охлаждения. В частности сопоставление температурного поля усиленной конструкции в исходном состоянии и под нагрузкой позволяет осуществить регистрацию процесса отслоения углепластика, что очень важно для анализа деформационного ресурса конструкции.

Математическое моделирование нестационарного процесса теплопередачи в системе «углеродный холст – эпоксидная смола – бетон – отслоение – бетон» на основе решения нестационарного уравнения теплопроводности позволило установить временную зависимость изменения температуры на свободной поверхности покрытия в процессе нагрева и охлаждения целостной балки и балки, имеющей отслоения. Моделирование процессов нагрева и охлаждения балки с углепластиковым покрытием показало, что наиболее информативным с точки зрения возможности обнаружения отслоений является стадия охлаждения балки. Были найдены режимы теплового воздействия, дающие наибольший тепловой отклик на наличие дефектов, а также оценены размеры дефектов, которые могут быть обнаружены данным способом.

На основе разработанной методики с использованием инфракрасной термографии проведен цикл экспериментальных исследований деформационных процессов в усиленных железобетонных балках. Испытания проводились на специально разработанном стенде, где реализовывалось квазистатическое нагружение железобетонной балки по схеме 4-точечного изгиба. Исследовался деформационный процесс от начальных этапов нагружения до полного разрушения. На последовательных стадиях нагружения балка подвергалась импульсному нагреву и последующему охлаждению. Регистрация теплового потока с поверхности балки осуществлялась тепловизором в инфракрасном диапазоне электромагнитного излучения

Получаемая совокупность термограмм обрабатывалась по специально разработанному алгоритму, который с высокой степенью надежности позволил фиксировать процесс начала и развития отслоения углепластика от поверхности бетона вплоть до разрушения балок-образцов. Термографические измерения дополнялись совокупностью механических: измерение деформаций в характерных сечениях балки с использованием тензодатчиков; измерение величины прогибов балки с использованием датчиков перемещений; регистрация процесса трещинообразования.

Полученные результаты продемонстрировали, что разработанная методика инфракрасной съемки поля температур может быть использована для контроля процессов отслоения композитных элементов усиления от поверхности железобетонных конструкций в эксплуатационных условиях. Показано, что факт отслоения углепластиковой ленты не означает достижения предельного состояния усиленной железобетонной балки. В частности, для исследованных балок это состояние характеризуется разрушением углепластиковой ленты. А

процесс отслоения может служить индикатором уровня напряженно-деформированного состояния балки.

Получены закономерности деформационных процессов в железобетонных балках, усиленных до приложения нагрузки и в ходе нагружения после появления первых трещин и их инъецирования, от начального этапа нагружения до полного разрушения. Эти закономерности могут быть использованы при разработке мероприятий по усилению железобетонных элементов, а также в системах мониторинга механического состояния конструкций при анализе остаточного ресурса конструкции.

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

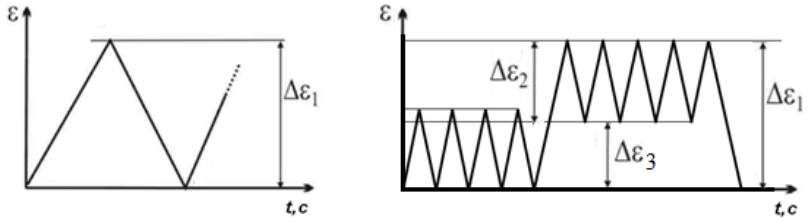
МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ ЦИКЛА

Ильиных А.В.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
д. 29, пр. Комсомольский, г. Пермь, 614000, Российская Федерация, e-mail: ilinih@yandex.ru

Эксплуатационные режимы работы некоторых высоконагруженных деталей и элементов конструкций определяют сложные изменения напряжённо-деформированного состояния во времени, что приводит к необходимости проведения экспериментальных исследований со специальным образом подобранными параметрами испытаний [1-3]. Целью работы является изучение закономерностей механического поведения конструкционных сплавов и анализ возможности прогнозирования долговечности в условиях малоцикловой усталости при переменных параметрах цикла нагружения.

В Центре экспериментальной механики ФГБОУ ВПО Пермского национального исследовательского политехнического университета были проведены испытания на малоцикловую усталость при разных формах цикла нагружения с постоянными параметрами (треугольная форма с разными коэффициентами асимметрии) и при программном нагружении с переменными параметрами цикла, представленными на рисунке 1.



а) *б*)

Рис. 1. Формы циклов с постоянными (*а* – треугольный) и переменными параметрами (*б* – программное нагружение)

Методика проведения экспериментальных исследований разрабатывалась в соответствии с требованиями стандартов ASTM E606-42 и ГОСТ 25.505-85. Использовались цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 6 мм из алюминиевого сплава Д16Т. Испытания проводились при комнатной температуре на сервогидравлической испытательной системе Instron 8801, позволяющей реализовывать различные программы циклического нагружения и содержащей в своем составе датчик усилий с точностью измерения нагрузки 0,5%. Управление по деформации в процессе испытаний осуществлялось при помощи осевых экстензометров Instron с базой 12,5 мм. Эксперименты проводились в режиме жёсткого нагружения. На каждом цикле регистрировались значения осевых напряжений и деформаций, информация о которых необходима для построения петель гистерезиса. Скорость деформирования поддерживалась постоянной в процессе испытаний. Циклирование образца завершалось при разрушении образца на две части, либо при уменьшении максимальной нагрузки в цикле на 20% по сравнению со значениями на первых циклах.

Для анализа закономерностей неупругого циклического деформирования и накопления повреждений при переменных параметрах циклов были выбраны несколько блоков программного нагружения, состоящих из последовательностей циклов с постоянными параметрами, но имеющих разные коэффициенты асимметрии и разные амплитуды деформации. Схемы программного циклического нагружения выбирались исходя из возможностей комбинирования из циклов с постоянными параметрами, для которых также были проведены испытания на малоцикловую усталость.

Полученный комплекс результатов испытаний алюминиевого сплава Д16Т на малоцикловую усталость с переменными и постоянными параметрами цикла рассматривается как основа для проверки адекватности существующих моделей накопления повреждений и прогнозирования усталостной долговечности.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-41-590392).

Литература

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.Ш., Ильиных А.В., Ратчиев А.М. Экспериментальная проверка модели суммирования повреждений при циклическом нагружении дисков турбин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012, Т. 14, № 4–5, С. 1372-1375.
2. Nikhamkin M., Ilinykh A. Low cycle fatigue and crack grow in powder nickel alloy under turbine disk wave form loading: validation of damage accumulation model // Applied Mechanics and Materials, 2014, Т. 467, С. 312-316.
3. Ильиных А.В. Экспериментальное исследование механического поведения конструкционных сплавов при малоцикловой усталости с постоянными и переменными параметрами циклов // В сборнике: XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики сборник докладов. Составители: Д.Ю. Ахметов, А.Н. Герасимов, Ш.М. Хайдаров; ответственные редакторы: Д.А. Губайдуллин, А.И. Елизаров, Е.К. Липачев. 2015, С. 1605-1607.

МЕХАНИКА ТКАНЫХ КЕРАМО-КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С ЛОКАЛЬНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ

Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация
e-mail: denis.v.dedkov@gmail.com, zav@pstu.ru, rector@pstu.ru

Процесс изготовления готовых изделий из тканых композитов связан с раскроем и выкладкой на оправку слоев ткани, а также их прошивка между собой. Армирующий каркас насыщается поликристаллической матрицей, в результате чего происходит одновременное создание элемента конструкции и материала, из которого он изготовлен. При производстве изделий из тканых композитов неизбежны технологические дефекты (пропуск волокон основы или утка, разрывы нитей при прошивке слоев), снижающие эксплуатационные свойства изделий и обнаруживающиеся только на этапе выходного ультразвукового контроля. Гарантированное обеспечение наличия в этих дефектах поликристаллической матрицы (при осаждении из газовой фазы или при карбонизации полимеров после пропитки под давлением, вакуумирования и доуплотнения каркаса), матрицы на основе терморасширенного графита или керамики затруднено. Это связано с тем, что образующийся на поверхности нитей слой осаждаемого материала препятствует дальнейшему насыщению каркаса.

Проведена оценка влияния сложной геометрии армирующего каркаса и локальных технологических дефектов на коэффициенты концентрации напряжений в слое композита полотняного плетения при сложном напряженно-деформированном состоянии, которые были получены при помощи разработанной ранее модели тканого материала с искривленными волокнами и поликристаллической матрицей [1–3]. Выбор полотняного переплетения обеспечил наиболее короткие перекрытия нитей, наибольшую прочность, плотность и повышенную жесткость, однородную, геометрически идентичную с лицевой и изнаночной стороны поверхность ткани. Моделирование нагружения слоя композита, волокна и матрица которого изотропны, линейно упруги, не изменяют геометрию, взаимное расположение и тип симметрии, в своей плоскости проводилось на основе численных решений краевых задач с помощью открытой интегрируемой платформы SALOME-MECA. Проведено вычисление эффективных упругих модулей при помощи разработанного расширения этой платформы, выполненного в виде подключаемого модуля на языке Python с возможностью реализации многопроцессорных параллельных вычислений (достигалась с помощью пакетов Parallel Python и MPI4PY, продемонстрировавших одинаковые результаты линейного кратного уменьшения временных затрат на проведение операций с плавающей точкой) [4]. С помощью платформы SALOME-MECA и разработанного модуля обработки больших массивов данных получены численные решения задач о макрооднородных напряженно-деформированных состояниях слоя и определены значения коэффициентов концентрации напряжений, вызванных наличием локальных технологических дефектов при наличии гарантированной прослойки матрицы вокруг нитей армирующего каркаса, а также контакта с трением.

Работа выполнена в рамках задания № 2015/152 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части госзадания Минобрнауки РФ (код проекта — 1911).

Литература

1. Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А. Концентрация напряжений в слое тканого композита с закрытыми внутренними технологическими порами // Вестник ПНИПУ. Механика. 2011. № 4. С. 29–36.

2. Дедков Д.В., Зайцев А.В. Концентрация напряжений в слое тканого композита с локальными дефектами при двухосном однородном равнокомпонентном деформировании // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. 2013. № 4 (33). С. 66–75.

3. Дедков Д.В., Ташкинов А.А. Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами при чистом формоизменении // Вычислит. механика сплошных сред. 2013. Т. 6. № 1. С. 103–109.

4. Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А. Эффективные упругие модули тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами // Известия Самарского НЦ РАН. 2014. Т. 16, № 4–3. С. 526–530.

СТАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРЫ, ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИТАХ

Зайцев А.В., Кокшаров В.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация
e-mail: zav@pstu.ru, koksharovvs@gmail.com

Исследование микроструктуры спеченных порошковых композитов, проводимое на микрошлифах, связано с определением скалярных величин: среднего размера неоднородности, объемной концентрации фаз, текстурного угла, определяющего преимущественную ориентацию зерен. Выбор технологических параметров при производстве порошковых композитов (измельчение с целью получения заданной исходной морфологии порошка и механолегирование, смешивание, уплотнение и спекание) влияют на разброс размеров, форму, взаимное расположения зерен в объеме материала и, как следствие, на его свойства. Недостаточная информативность скалярных величин при определении закономерностей внутренней случайной структуры, приводит к необходимости использования аппарата случайных функций. На основе доказанных теорем о геометрическом смысле условных вероятностей был предложен новый метод аналитического построения многоточечных моментных функций случайной структуры 2D (волокнистых) и 3D (дисперсно-упрочненных) армированных композитов матричного типа, который позволил записать выражения в виде рядов с конечным числом членов [1]. Получены значения производных условных и безусловных моментных функций второго и третьего порядков случайной структуры композитов в точках, соответствующих нулевому значению аргументов, которые, как было показано, определяются отношением мер, связанных с межфазной границей и исследуемым фрагментом. Сформулированы и доказаны теоремы о знаке производных и о локальной изотропии случайных полей структуры [2–4]. Для 2D и 3D композитов были получены выражения для условных и безусловных моментных функций второго порядка полей напряжений и деформаций, определены закономерности взаимодействия в ансамбле частиц [5]. Проведены обобщения этих результатов на класс спеченных порошковых композитов, сформулированы и доказаны следующие теоремы.

Теорема 1. Производные условных и безусловных моментных функций второго порядка случайных полей напряжений и деформаций в 2D и 3D порошковых материалах в точках, соответствующих нулевому значению аргумента, отрицательны, их значения не зависят от направления, в котором ведется построение функций, и координационного числа, а величина обратно пропорциональна суммарному периметру (площади) границ зерен.

Теорема 2. Случайные поля напряжений и деформаций в 2D и 3D неоднородных порошковых материалах локально изотропны в приближении «малых расстояний».

Искомые производные могут рассматриваться в качестве критерия для верификации и отбраковки существующих и разрабатываемых моделей, используемых при построении решений стохастических краевых задач механики неоднородных материалов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 15–01–08678).

Литература

1. Зайцев А.В., Покатаев Я.К. Новый метод построения моментных функций второго порядка случайной структуры полимербетонов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2007. № 15. С. 28–45.

2. Зайцев А.В., Лукин А.В., Трефилов Н.В. Закономерности скейлинга в случайных полях структуры однонаправленно армированных волокнистых композитов // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № S1–1 С. 58–61.

3. Зайцев А.В., Лукин А.В., Ташкинов А.А., Трефилов Н.В. Случайные структуры двухфазных композитов: синтез, закономерности, новая оценка характерных размеров представительных объемов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2004. № 12. С. 30–44.

4. Зайцев А.В., Лукин А.В., Трефилов Н.В. Компьютерный синтез, закономерности случайных структур и моделирование процессов разрушения волокнистых композитов при продольном сдвиге // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 5. С. 73–79.

5. Зайцев А.В., Кислицын А.В., Кокшаров В.С. Общие закономерности структуры, случайных полей напряжений и деформаций в волокнистых и дисперсно-упрочненных композитах // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4–4. С. 1485–1487.

УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА И КОМПОЗИТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Зайцев А.В., Кокшаров В.С., Судаков И.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация
e-mail: zav@pstu.ru, koksharovvs@gmail.com, sudakov-ia@yandex.ru

Терморасширенный графит (ТРГ) — уникальный материал, который даже при повышенных температурах, термоциклировании и контакте с агрессивными средами обладает высокими деформационными свойствами, термо-химической стойкостью и низким коэффициентом трения. Уплотнительные элементы (УЭ) из ТРГ, к числу которых относятся уплотнительные кольца (УК) и сложные разборные конструкции, надежны, не требуют дополнительной герметизации при эксплуатации, работают при температурах до 560 °С и давлениях до 40,0 МПа в кранах с уплотнениями по штоку и во фланцевых соединениях трубопроводов различного диаметра. Разработана модель начального режима работы УК [1, 2] и УЭ из ТРГ для трубопроводной арматуры большого диаметра [3], учитывающая цилиндрическую анизотропию, экспериментально определенные упругие и прочностные характеристики ТРГ. Контактное давление определялось экспериментально на основе разработанной методики с использованием ультратонких пленок Fuji Prescale, размещаемых в зоне контакта. Получены новые численные решения задач для отдельных колец и их пакетов в режиме «приработки», квазистационарных условиях без износа, проведена оценка начальной прочности при различных температурах и давлениях рабочей среды, различной толщине и количестве УК в сальниковой камере, различных режимах возвратно-поступательного и вращательного движения штока, а также различных условиях на поверхностях контакта.

Основной причиной выхода из строя трубопроводной арматуры является протечка во фланцевых соединениях, герметичность которых достигается путем точной установки УЭ, заданными моментами затяжки шпилек, обеспечивающих однородность давления по всей площади контакта, «жесткими» требованиями по шероховатости и отклонениям от параллельности поверхностей фланца. Для повышения прочности и износостойкости, было предложено новое конструктивное решение — армирование ТРГ перфорированной металлической пластиной (были определены эффективные свойства и коэффициенты концентрации напряжений [4, 5]), вызвавшей неоднородность распределения давления на поверхности контакта УЭ и фланца, что было подтверждено качественным и количественным совпадением результатов тестовых расчетов и натурных испытаний с использованием пленок Fuji Prescale на стенде для гидравлических испытаний на герметичность фланцевых уплотнений СИГ–1.400. Было показано, что перепады давлений, вызванные неоднородностью армированного УЭ, не оказывают влияния на эксплуатационные характеристики, а неоднородность контактного давления, вызванная отклонением от параллельности поверхностей фланца, приводит к значительным перепадам давлений и разгерметизации.

Работа выполнена в рамках задания № 2015/152 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части госзадания Минобрнауки РФ (код проекта — 1911).

Литература

1. Зайцев А.В., Рогов Д.С. Моделирование начального режима работы кольца из терморасширенного графита в кранах с уплотнением по штоку // Известия Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14. № 4–5. С. 1235–1238.

2. Зайцев А.В., Злобин Н.Г., Исаев О.Ю., Смирнов Д.В. Моделирование условий эксплуатации и уточненный прочностной анализ уплотнительных элементов из терморасширенного графита // Вестник ПНИПУ. Механика. 2012. № 4. С. 5–19.

3. Зайцев А.В., Кокшаров В.С. Предков И.В. Механическое поведение составных уплотнительных элементов из терморасширенного графита для фланцевых соединений

трубопроводов большого диаметра // Известия Самарского НЦ РАН. 2014. Т. 16, № 4–3. С. 542–546.

4. Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А. Концентрация напряжений в слое тканого композита с закрытыми внутренними технологическими порами // Вестник ПНИПУ. Механика. 2011. № 4. С. 29–36.

5. Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А. Эффективные упругие модули тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами // Известия Самарского НЦ РАН. 2014. Т. 16, № 4–3. С. 526–530.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКРИТИЧЕСКОЙ СТАДИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН

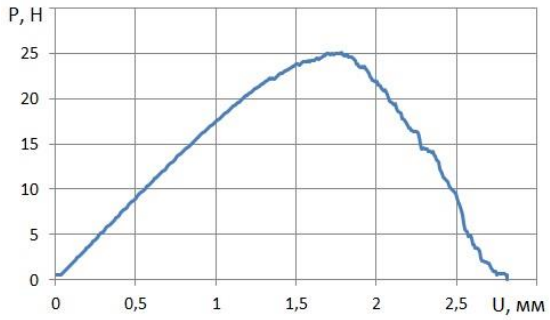
Темерова М.С., Вильдеман В.Э.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Центр экспериментальной механики, д. 29, Комсомольский пр. г. Пермь, Российская Федерация,
e-mail: cem.temerova@gmail.com , wildemann@pstu.ru

Закритическая стадия деформирования является одной из характерных особенностей нелинейного поведения материалов, связанного с накоплением структурных повреждений. Закономерности закритического деформирования необходимо знать при использования деформационных резервов материала для повышения живучести и несущей способности конструкции. Каждая точка на ниспадающей ветви может соответствовать моменту потери несущей способности [1].

Для расчета несущей способности и проектирования конструкционных или функциональных элементов из тканых материалов необходимо на начальном этапе знать закономерности деформирования и механизмы разрушения, а также механические свойства армирующих компонентов [2, 3].

Работа посвящена экспериментальному исследованию механических свойств и разрушению пучков из базальтовых волокон. Рассматривались пучки с количеством нитей n=1,2,3 и 5. Испытания на растяжение проводились на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5965 с использованием тисочных захватов. Исследование проводились в соответствии с рекомендациями ГОСТ 6611.2-73, ГОСТ 6943.5-79 и опыта проведения экспериментальных исследований механических свойств нитей [4, 5, 6, 7]. Производилось предварительное нагружение равное 0,5Н. Скорость подвижного захвата составила 5 мм/мин.



Типовая диаграмма деформирования базальтового пучка волокон

Получены диаграммы деформирования и максимальные разрушающие нагрузки пучков с различным количеством волокон. На рисунке приведена характерная зависимость перемещения от нагрузки. На диаграмме четко выражены участки вступления волокон в работу, разрушение основной части волокон и постепенное разрушение оставшихся волокон. Полученные прочностные характеристики волокон характеризуются большим статистическим разбросом, который может быть связан с несовершенством производства волокон, и который необходимо учитывать при моделировании и изготовлении конструкционных и функциональных материалов из них.

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 /. Под ред. Ю. В. Соколкина .— М. : Наука : Физматлит, 1997 .— 288 с.
2. Грушецкий И.В., Димитриенко И.П., Ермоленко А.Ф. и др. Разрушение конструкций из композитных материалов. Под ред. В.П. Тамужа, В.Д. Протасова. – Рига: Зинатне, 1986.-264 с.
3. Скардино Ф., Хирл Дж., Кавабата С. И др. Тканые конструкционные композиты: Пер. с англ./ Под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко. – М.: Мир, 1991. – 432 с., ил.

4. Лобанов Д.С., Темерова М.С. Особенности квазистатических испытаний нитей и тканей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 2. – С. 96–109.

5. Федоров А.Е., Самарцев В.А., Гаврилов В.А., Вильдеман В.Э., Словиков С.В. Экспериментальное исследование механических свойств современных хирургических рассасывающихся шовных материалов // Российский журнал биомеханики. – Т. 13, № 4 (46). – 2009. – С. 78–84.

6. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – №2. – С. 93–98

7. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Анализ влияния жесткости нагружающей системы на стадию закритического деформирования материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – №3. – С. 49–57.

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРОЗОНДОВОГО МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТАДИЙНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Прохоров А.Е., Плехов О.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, д.1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация, e-mail: prokhorov.a@icmm.ru, poa@icmm.ru

В настоящее время актуальным является вопрос экономии ресурсов и повышения экономической эффективности производства, которое требует обеспечения безопасного ресурса эксплуатации различных механизмов и конструкций, таких как транспортные мосты, железнодорожные рельсы, детали газотурбинных двигателей и т.д., вплоть до $1 \cdot 10^{10}$ циклов нагружения. Проведение экспериментального исследования усталостных свойств материала на такой базе циклов предполагает существенные временные затраты.

На сегодняшний день наиболее удобными для проведения подобных испытаний являются ультразвуковые испытательные машины с частотой порядка 20 кГц[1–3].

Разработанный датчик для измерения магнитных свойств исследуемого образца может рассматриваться как модификация феррозондового метода неразрушающего контроля. В данном случае образец одновременно является объектом исследования и феррозондом. В процессе эксперимента на образце размещаются два соленоида, намагничивающий и измерительный. Переменный ток внутри намагничивающего соленоида намагничивает образец до насыщения. При изменении структуры образца, связанной с появлением структурных дефектов, на измерительной катушке, появляется нелинейный «полезный» сигнал. В процессе зарождения трещины в режиме гигацикловой усталости обычно образуется подповерхностная трещины с характерным размером порядка 30 мкм, появление дефекта в выраженной объемной модой изменяет эффективное сечение образца и провидит к изменению его индуктивности. Малые изменения индуктивных свойств образца в процессе испытания делают невозможным измерение средних величин и диктуют необходимость анализа нелинейных эффектов. Особенно чувствительной к изменению магнитного поля внутри образца (индуктивности образца) является вторая гармоника сигнала на измерительном соленоиде.

В процессе эксперимента наблюдается изменение амплитуды второй гармоники наблюдается существенный рост процессе испытания образца. Изменение магнитной проницаемости может быть вызвано рядом физических процессов, таких как дисперсное накопление дефектов, образование усталостной трещины или изменение магнитных характеристик материала вследствие перегрева образца.

Предварительные эксперименты позволяют говорить о возможности применения данного метода для контроля процессов эволюции структуры материала в ходе усталостных испытаний на ультразвуковой испытательной машине и оценить продолжительность финальной стадии процесса исчерпания деформационного ресурса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-31-00155.

Литература

1. Shaniavski A.A., Skvortsov G.V. «Fatigue limit – Material property as an opened or closed system? Practical view on the aircraft components failures in GCF area» // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 1999. – Vol. 22. – No. 7. – P. 609–619.
2. Plekhov O., Palin-Luc T., Naimark O., Uvarov S., Saintier N.«Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography» // Fatigue and fracture of engineering materials and structures.– 2005. – Vol. 28. – Iss. 1. – P. 169–178.
3. Bathias C., Paris P.C. «Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice»// New York: CRC Press, 2004. – 328 p.
4. Sakai T. «Review and prospects for current studies on very high cyclic fatigue of metallic materials for machine structural use» // Journal of solid mechanics and materials engineering. – 2009. – Vol. 3. – No. 3. –P. 425–439.

5. Наймарк О.Б., Плехов О.А., В.И. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В. «Кинетика накопления дефектов и дуальность кривой Веллера при гигацикловой усталости металлов» // ЖТФ. – 2014. – Т. 84,вып. 3. – С. 89–94.

ОЦЕНКА КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОНЕНТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТКД

Терехина А.И., Плехов О.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, д.1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация, e-mail: terekhina.a@icmm.ru, poa@icmm.ru

Распространенность металлических конструкций в различных отраслях промышленности обуславливает актуальность задач оценки долговечности конструкций с целью определения дальнейшей стратегии их эксплуатации. Увеличение скорости нагружения приводит к снижению деформационной способности, уменьшению размера пластической зоны и охрупчиванию материала [1]. Однако, экспериментально обнаружена и обратная зависимость динамической прочности. Данный факт обуславливает необходимость создания адекватных моделей и методов, позволяющих прогнозировать механическое поведение материалов в широких условиях внешних воздействий, включая интенсивные динамические нагрузки для материалов имеющих как прямую, так и обратную скоростную чувствительность. Для решения этой проблемы, мы предлагаем использование теории критических дистанций (ТКД), эффективность которой уже была показана при прогнозировании процесса разрушения лабораторных образцов сложной геометрии из различных материалов в условиях квазистатического и динамического нагружений [2, 3].

Согласно ТКД, использование линейно-упругих полей напряжений в области вершины концентратора напряжений позволяет оценить прочность компонентов с погрешностью, не превышающей 20% [4]. Разрушение наступит тогда, когда эффективное напряжение, зависящее от величины критической дистанции, превысит предел прочности материала.

В ходе данного исследования были проведены серии экспериментов на одноосное растяжение цилиндрических образцов. Исследовалось влияние размера выреза полукруглого и острого профилей на прочность. Было использовано три типа материалов: с прямой скоростной чувствительностью (ВТ6 и ВТ1-0) и с обратной скоростной чувствительностью (АМг6). Механические испытания на растяжение при квазистатических условиях нагружения проводились с использованием электромеханической испытательной машины «Shimadzu AG-X Plus». Динамические испытания проводились на разрывном стержне Гопкинсона-Кольского. Моделирование линейно-упркугих полей выполнено с помощью конечно-элементного пакета Abaqus/Explicit.

Результаты линейно-упругого анализа распределения напряжений подтверждают, что когда внешние напряжения превышают критические на половине критической дистанции происходит обострение концентрации дефектов в области концентратора, что способствует разрушению. Использование ТКД дает оценку квазистатической и динамической прочности для материалов с различной скоростной чувствительностью, попадающую в интервал погрешности ± 10-15% для образцов с концентраторами напряжений с различным радиусом кривизны (от стандартных инженерных значений радиуса до радиусов кривизны, наблюдаемых в вершине трещины). Исходя из этого, можно заключить, что введение параметров с размерностью длины для анализа предельных состояний конструкций с концентраторами напряжений является эффективным и физически оправданным методом для оценки их прочности.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-48-590148 р_а, № 14-01-96005.

Литература

1. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности // Монография / М.: Наука, 2008. – 334 с.

2. Yin T., Tyas A., Plekhov O., Terekhina A., Susmel L. A novel reformulation of the Theory of Critical Distances to design notched metals against dynamic loading // Materials and Design, 69 (2015), 197–212.

3. Yin T., Tyas A., Plekhov O., Terekhina A., Susmel L. On the use of the Theory of Critical Distances to estimate the dynamic strength of notched 6063-T5 aluminium alloy. Frattura ed Integrita Strutturale, 30 (2014), 220–225.

4. Susmel, L., Taylor, D. On the use of the Theory of Critical Distances to predict static failures in ductile metallic materials containing different geometrical features // Engineering Fracture Mechanics, 75 (2008), 4410–4421.

5. Taylor D. The Theory of Critical Distances: A new perspective in fracture mechanics // Elsevier, 2007.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Желнин М.С.[1], Изюмова А.Ю.[2], Плехов О.А.[2]

[1] *Пермский государственный национальный исследовательский университет, д. 15, ул. Букирева, г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: zhelninmax@gmail.com*

[2] *Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, д. 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация, e-mail: fedorova@icmm.ru*

Способность материала проводить тепло является одним из важнейших свойств, позволяющих оценивать как возможность применения материала в заданных условиях, так и получать информацию о его механическом состоянии. Как известно, пластическое деформирование металлов сопровождается выделением значительного количество тепла. Существуют энергетические критерии разрушения материалов [1, 2], основанные на оценке доли диссипированной и затраченной на деформирование энергии. Знание теплофизических констант материала необходимо для корректного решения уравнения теплопроводности, на основе которого оценивается мощность процесса диссипации энергии при деформировании, как в условиях статического теста, так и в области вершины трещины при усталостных испытаниях [3, 4].

Основными особенностями развиваемой в данной работе методики, в отличие от уже существующих [5], являются одновременное определение констант температуропроводности и теплопроводности из одного эксперимента и возможность их расчета непосредственно во время механических испытаний. В перспективе это позволит оценивать изменение теплофизических свойств металлов в зависимости от степени деформации на различных этапах нагружения.

Теоретической основой методики является аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности Карслоу и Егера [6]. Экспериментальная установка состоит из инфракрасной камеры, локального точечного нагревателя и образца, закрепленного в зажимах. Мощность источника “на образце” изначально не известна и определяется из эксперимента по нагреванию референтного материала, теплофизические константы которого представлены в справочных источниках. Константы температуропроводности и теплопроводности определяются путем соотнесения аналитической кривой и экспериментальных данных изменения температуры на обратной стороне образца при его точечном нагреве. В данной работе в качестве референтного материала была выбрана сталь 08Х18Н10. Исследовались теплофизические свойства титановых сплавов ОТ4-0, ОТ4, Вт1-0. Было показано, что разрабатываемая методика позволяет получать достаточно точные величины температуропроводности (погрешность около 5%) и теплопроводности (погрешность около 10%). При этом экспериментальная установка дает возможность проводить исследования при механическом деформировании исследуемого образца и контролировать величины теплофизических констант во время испытаний, что позволит увеличить точность расчета мощности диссипации тепла на всех стадиях деформирования, включая стадию образования “шейки”.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-31-00130 и №14-01-00122).

Литература

1. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids//Phil. Trans. Roy. Soc., ser. A. – 1920. – V. 221. – P. 163 – 198.

2. Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. – Ташкент: изд-во ФАН Узбекской ССР, 1985. – 168 с.

3. Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Прохоров А.Е., Плехов О.А., Venkatraman B. Исследование эволюции источников тепла в процессе упруго-пластического деформирования титанового сплава ОТ4-0 на основе контактных и бесконтактных измерений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – No 1. – С. 68–81.

4. Fedorova A., Bannikov M., Terekhina A., Plekhov O. Heat dissipation energy under fatigue based on infrared data processing // Quantitative Infrared thermography journal. – 2014. – Vol. 11. – P. 2–9.

5. Tseng-Wen Lian et all. Rapid thermal conductivity measurement of porius thermal insulation material by laser flash method // Advanced Powder Technology. – 2016. – Vol. 1. – P. 1–4.

6. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. – Oxford: Clarendon Press, 1959, 2nd ed. – 510 p.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Сулейманов Р.Н.[1], Чекалкин А.А.[2]

ПНИПУ, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация
e-mail: [1]SuleymanovRN@gmail.com, [2]A.A.Chekalkin@yandex.ru

Строительство подземных объектов, к которым относятся и вертикальные стволы шахт, является наукоемким и ресурсозатратным процессом Существует несколько способов воздействия на массив горных пород для обеспечения безопасности при стоительстве в сложных гидрогеологических условиях, такие как: замораживание, водопонижение, тампонаж [1].

В связи с тем, что строительство исследуемого объекта, находящегося на Талицком участке Верхнекамского месторождения, проходит через горный массив, который характеризуется сложной структурой и присутствием нескольких водоносных горизонтов, для обеспечения быстрой и безопасной проходки шахтного ствола был принят метод замораживания. Данный метод позволяет создать прочное и в необходимой степени водонепроницаемое ограждение, что является важным при строительстве объектов в подобных условиях.

В данной работе рассматривается процесс формирования ледопородного массива при проходке шахтных стволов. Используя проектировочные расчеты, предоставленные заказчиком, а также упрощенные аналитические модели нестационарной теплопроводности бесконечного полого цилиндра и бесконечной стенки [2], на основе экспериментальных данных были получены зависимости температуры от времени замораживания для требуемой толщины ледопородного колодца. Также было проведено моделирование динамики температурного поля при образования ледопородного колодца с использованием прикладного пакета «ANSYS». В связи с тем, что структура горного массива не однородна, скважины не прямолинейны, поэтому, для обеспечения более точного отображения состояния горного массива по всей глубине, были использованы инклинометрические данные скважин. Применение данного пакета позволило наглядно отобразить и исследовать процесс замораживания горного массива по всей глубине. Также было проведено моделирование нестационарной теплопроводности с учетом фазового перехода.

Анализируя полученные данные, можно предположить, что усовершенствование расчетной модели приводит к показаниям, близким проектировочным. Но разница между результатами расчетов, равная величине 60 суток, является достаточно большой, чтобы полагаться на проектировочные расчеты, также как и на расчеты математического моделирования.

В дальнейшем планируется подробно рассмотреть структуру горного массива, его теплофизические и механические свойства, В связи с тем, что горный массив представляет собой сложный композиционный материал [3], планируется усовершенствовать расчетную модель, которая будет учитывать как сложное распространение температур, так и его воздействие на НДС породы[4], надежность и долговечность крепи, образование и развитие трещин[5], используя методы и подходы механики композиционных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края *в рамках научного проекта №16-41-590375 р_а*

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. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Том 1. Анализ парадигмы. Донецк: Норд-Пресс, 2008. 632 с.
3. A.El Moumen, T. Kanit, A. Imad, H.El Minor. Computational thermal conductivity in porous materials using homogenization techniques: Numerical and statistical approaches // Computational Materials Science, no. 97, 2015, pp. 148–158

4. 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.

5. Газизов Р.Я., Калюлин С.Л., Сулейманов Р.Н., и др. Расчет эффективной трещиностойкости для упругопластической слоистой среды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2014. № 37. С. 154 – 171

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ КЕРАМИКИ НА СТАТИСТИКУ ФРАГМЕНТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Банникова И.А.*, Уваров С.В., Наймарк О.Б.

ИМСС УрО РАН, д.1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация

**e-mail: malgacheva@icmm.ru*

В рамках построения теоретической модели разрушения керамических образцов в процессе фрагментации на основе подхода, описывающего переход от дисперсной повреждённости к разрушению как структурно-скейлинговый переход в ансамбле мезодефектов [1], необходимо учитывать начальное распределение дефектов, например, пористость.

В настоящей работе проведены эксперименты по разрушению трубчатых образцов из керамики (Al2O3) высотой – 15–17 мм, внутренним и внешним диаметром – 7,8 и 11,9 мм, под действием электрического взрыва проводника (ЭВП). Трубка с коаксиальным проводником устанавливалась вертикально в центре цилиндрической взрывной камеры (кювета) [2]. Кювета заполнялась дистиллированной водой. В результате разряда конденсаторной батареи инициировалась ударная волна, распространяющаяся в радиальном направлении. Изменение нагружающего параметра – удельной энергии разряда (4–23 Дж/г) варьировалось за счет изменения энергии на конденсаторной батарее. Масса собранных со дна кюветы фрагментов составляла не менее 98% массы исходного образца, что обеспечивало, по сравнению с известными экспериментальными постановками, представительную статистическую выборку и качество анализа статистики фрагментации. Фрагменты классифицировались по двум типам: квазидвумерные (2D), для которых характерный размер фрагмента d^* был больше или равен толщине стенки трубки d; и трёхмерные (3D), для которых $d^* < d$.

В результате анализа статистики фрагментов установлено [2], что распределение 3D фрагментов по массе аппроксимируется степенной функцией, показатель степени которой не зависел от энергии нагружения, а распределение 2D фрагментов описывается экспоненциальным уравнением. Это согласуется со сценарием фрагментации модели Мотта, применительно к разрушению оболочек [3–4], когда только величина импульса нагружения влияет на вид распределения.

Мелкие 3D фрагменты исследовались отдельно от крупных. Используя «метод фотографии», приведенный в работе [5], вычислялась видимая площадь мелких фрагментов. Торцы керамических образцов, отшлифованные для исключения возможных очагов зарождения дефектов, исследовались на цифровом оптическом микроскопе HIROX KH-7700 при разных увеличениях. Проанализировав распределения площади пор в сечении $N\left(S_p\right)$ и распределения 3D фрагментов $N\left(S_f\right)$, было показано, что данные распределения $\frac{N}{S_{ph}}\left(S_p\right)$ описываются единой степенной зависимостью при нормировании N на единицу площади всей фотографии S_{ph}, а данные распределения 3D фрагментов по площади в координатах $\frac{N}{S_{ph}}\left(S_f\right)$ легли на кривую под таким же углом наклона. Это говорит о возможной прямой связи изначальной пористости с конечным распределением 3D фрагментов по размеру.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 14-19-01173.

Литература

1. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения. // Физическая мезомеханика, 2003, №6 с 45–72.
2. Bannikova I., Uvarov S., Naimark O. Analysis of fragmentation statistics of alumina tubular specimens // AIP Publishing LLC, 2014. V.1623, p.59–62.
3. Mott N. Fragmentation of Shell Cases // Proc. Royal Soc., 1947. V.189(1018), p.300–308.

4. Grady D. Fragmentation of rings and shells. In: Springer, Verlag Berlin Heidelberg. Printed in Germany, 2006. pp. 374.

5. Bannikova I., Uvarov S, Davydova M., Naimark O. Study of ceramic tube fragmentation under shock wave loading // Proc. Materials Sc., 2014. V. 3, p. 592–597.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРРОЗИИ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Новиков В.Ф.[1], Муратов К.Р.[1], Тихонов К.В.[1], Устинов В.П.[2]

[1]*ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация, e-mail: physics1@tsogu.ru*

[2]*ЗАО «Пургаз», д. 52, микрорайон 16, 629830, г. Губкинский, Российская Федерация, e-mail: zaopurgaz@purgaz.com*

Для борьбы с коррозией стали используются защитные покрытия, электрохимическую и химическую защиту и др. [1]. Но коррозия зависит от агрессивности среды, химического состава и структуры стали. Для контроля коррозионной активности стали используется гравиметрический [2], металлографический [3], магнитный методы [4], метод определения химического потенциала [5] и др. Последние два метода являются неразрушающими.

Механические характеристики выборочно контролируются, как правило, разрушающим методом, коррозионные свойства практически не контролируются, а известные методы контроля являются разрушающими и требуют много времени. Наравне с контролем исходных механических характеристик материала необходимо разрабатывать надежные ускоренные методы прогнозирования коррозионной активности (КА). Для того чтобы разрабатывать новые методы и приборы, позволяющие решать эти задачи на научном и практическом уровне, необходимы новые параметры неразрушающего контроля.

Целью работы является поиск нового подхода к разработке неразрушающего прогнозирования коррозии.

В работе [2] приведена зависимость величины коррозионной потери массы стали У10 в разбавленной (1%) серной кислоте от температуры отпуска. (рис 1.) Видно, что скорость коррозии стали существенно зависит от температуры отпуска.

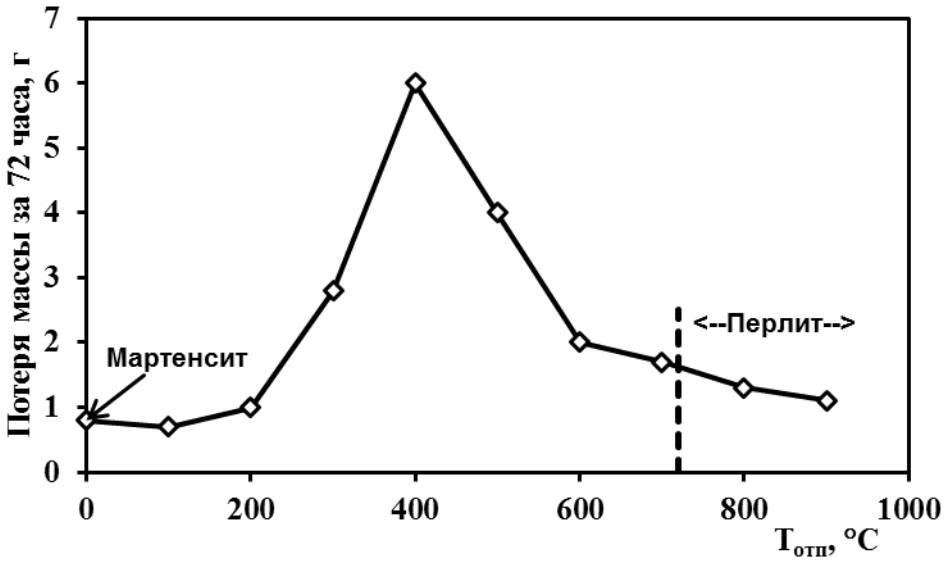


Рис.1. Влияние термообработки на коррозию полированных образцов стали У10 в 1 % H_2SO_4, время отпуска примерно 2 ч[2].

В магнитной структуроскопии устанавливаются корреляционные связи между структурным состоянием сталей и их магнитными параметрами. Одним из наиболее широко используемых параметров является коэрцитивная сила H_c, которая за редким исключением монотонно убывает с ростом температуры отпуска [6]. Сопоставление изменений H_c стали У10 слабо коррелируют с ее коррозионной убылью.

Тонкодисперсная структура сказывается на релаксационных свойствах, в частности на релаксационной магнитной восприимчивости χ_r [7]. Данные приведенные в [6] по χ_r высокоуглеродистых сталей показывают, что она изменяется с температурой отпуска не монотонно (рис.2). Вид зависимости $\chi_r(T_{отп})$ качественно согласуется с зависимостью коррозионной

убыли массы близкой по химическим свойствам стали, подвергнутой тем же видам термообработки (рис.1).

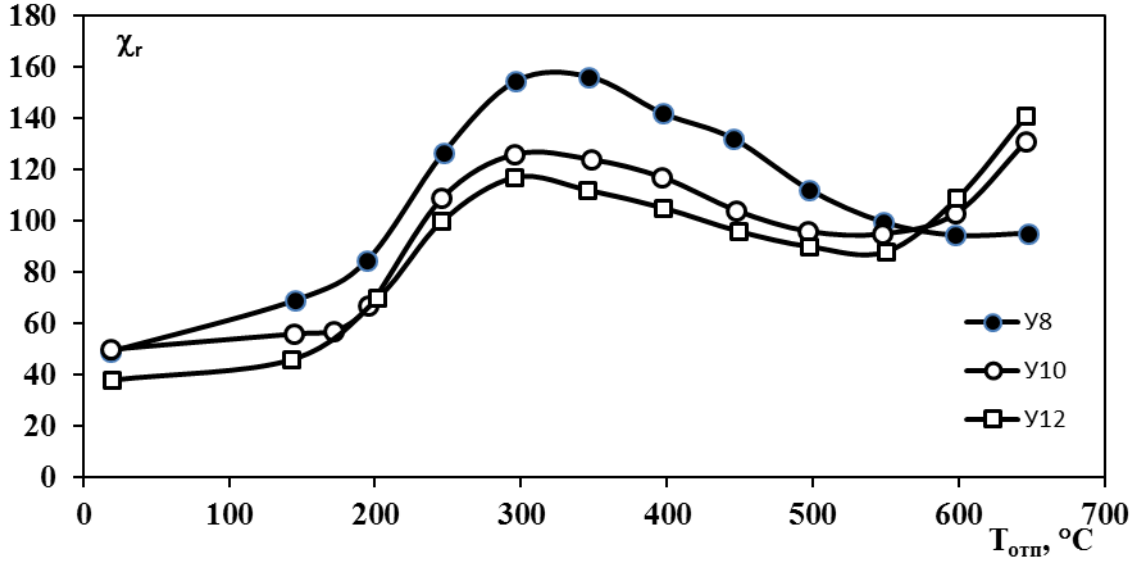


Рис.2.Зависимость релаксационной магнитной восприимчивости χ_r от температуры отпуска для сталей У10,У11,У12.

На рис. 3 приведен построенный нами график, связывающий коррозионную убыль массы и релаксационную магнитную восприимчивость χ_r для стали У10 по результатам работ [1] и [6]. Из рисунка следует достаточно хорошая связь между скоростью коррозии и релаксационной магнитной восприимчивостью. Выпадающие из монотонной зависимости точки соответствуют температурам отпуска 600 и 650°С.

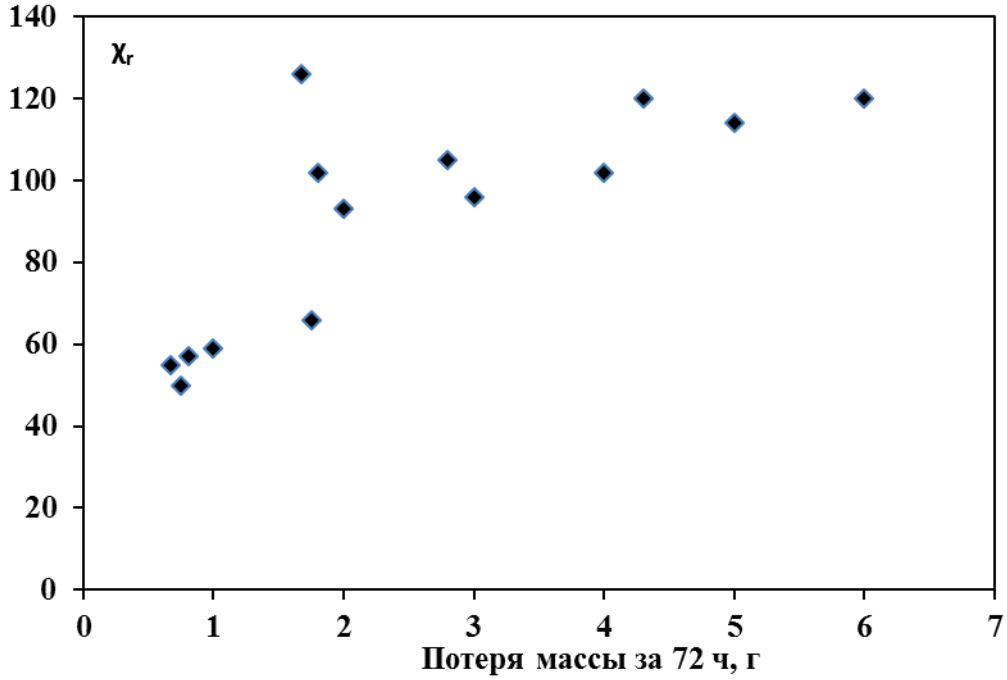


Рис. 3.Связь между релаксационной магнитной восприимчивостью χ_r коррозионной убылью массы стали У10.

Вывод: Хорошая корреляционная связь между скоростью коррозии и релаксационной магнитной восприимчивостью дает основание для разработки метода неразрушающего прогнозирования коррозии по магнитной релаксационной восприимчивости.

Литература

1. Коллакот Р.А. Диагностика повреждений.- М.: Мир

2. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов. М., 1987, 203 с.
3. Малахов А.И. Жуков А.П. Основы материаловедения и теория коррозии. М:. 1989, 516с.
4. Патент РФ № 2570704. Способ и устройство для контроля избыточной коррозии стали. Зарегистрировано 16.11.2015 г. (авторы Новиков В.Ф, Устинов В.П., Радченко А.В., Евко В.П.)
5. ГОСТ 9.008-85.ЕСЗКС. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. ИПК издательство стандартов. Москва. 2004 г.
6. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург. 2005 г. с. 218.
7. Царькова Т.П. Автореферат дис. канд. тех. Наук-катеринбург.1995. с. 5–102.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ НАГРУЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОЦЕССОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ И ТЕМПЕРАТУР

Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: cem.tretyakova@gmail.com

К числу актуальных направлений исследований в области механики деформируемого твердого тела относится экспериментальное изучение и теоретическое описание закономерностей пластического деформирования. Особый интерес вызывает вопрос влияния параметров нагружения: температуры, скорости внешнего воздействия, геометрии образцов, условий нагружения (кинематическое/силовое, свойства нагружающей системы) на эффекты пластического деформирования материалов.

Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния свойств нагружающей системы на закономерности механического поведения конструкционных металлов в условиях проявления пространственно-временной неоднородности пластического деформирования на основе анализа неоднородных полей деформаций и температур [1, 2]. Реализована методика исследования влияния свойств нагружающей системы на процессы упругопластического и закритического деформирования, формирования макроскопической локализации пластического течения в условиях проявления деформации Чернова-Людерса, эффекта Портевена-Ле Шателье на основе использования образцов с дополнительными участками деформирования, а также со специальной усложненной геометрией [3]. Использование образцов подобной геометрии позволяет проводить экспериментальное исследование влияния свойств нагружающей системы в условиях снижения её жесткостных характеристик по отношению к рабочей части.

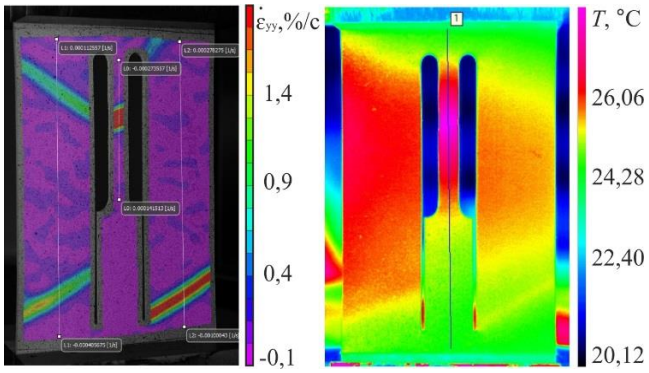


Рис. 1. Неоднородное поле локальных скоростей продольного деформирования и температур при распространении полос ПЛШ

Получены результаты анализа характера развития неоднородности полей деформаций и температур при прерывистом пластическом деформировании с учётом свойств нагружающей системы (рис. 1). Проведена оценка влияния свойств нагружающей системы на квазипериодический характер развития неоднородности полей деформаций, заключающийся в чередовании стадий возникновения локальных зон активного пластического течения материала (инициирование и распространение деформационных полос) и стадий макроскопического выравнивания уровня деформации по образцу [1].

Проведено исследования закономерностей неупругого деформирования на стадии разупрочнения материалов, получены результаты анализа конфигурации неоднородных деформационных и температурных полей в зоне формирования «шейки» при одноосном растяжении сплошных цилиндрических образцов и образцов-лопаток. Получены опытные данные, характеризующие неоднородность пластического деформирования углеродистой стали и алюминиево-магниевого сплава в испытаниях на одноосное растяжение при постоянных значениях скорости внешнего воздействия. Проведен анализ диаграмм деформирования, температурных полей, полей продольных, поперечных и сдвиговых деформаций, локальных скоростей деформирования и их зависимостей от времени.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00069) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

1. Ломакин Е., Третьякова Т., Вильдеман В. Эффект квазипериодической гомогенизации пластических деформаций в процессе растяжения образцов алюминиево-магниевого сплава // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 461, № 2. – С. 168–171.

2. Вильдеман В., Ломакин Е., Третьякова Т. Запаздывание текучести и пространственно-временная неоднородность пластического деформирования углеродистой стали // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2015. – № 4. – С. 56–67.

3. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Евецкий Ю.Л. Методика построения полных диаграмм деформирования листовых материалов // Пробл. прочности. – 1986. – № 9. – С. 29–32.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ И ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б.

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

Особенности поведения металлов и керамик в условиях динамического и ударно-волнового нагружения являются предметом активных исследований, которые включают экспериментальное изучение поведения материалов и разработку широкодиапазонных математических моделей. Существенные трудности при исследовании физических явлений вносят вопросы идентификации параметров и адекватности разработанной модели, которые требуют использование результатов эксперимента в широком спектре скоростей нагружения.

В настоящей работе основной акцент исследований сделан на изучение закономерностей формирования волновых (упругопластических) фронтов, релаксации упругого предвестника и разрушения в металлах и керамиках, обусловленных нелинейной кинетикой развития дефектов, их влиянием на механизмы структурной релаксации, неупругого деформирования и пластического течения, локализацию поврежденности и разрушение материалов в диапазоне скоростей деформации 10^4-10^6 $с^{-1}$. Значительное внимание в работе, наряду с обоснованием модели, уделено идентификации параметров и экспериментальной верификации модели на основе данных оригинальных экспериментов в указанном диапазоне интенсивностей нагружения.

В рамках широкодиапазонных определяющих соотношений для среды с дефектами разработана математическая модель деформационного поведения и разрушения материалов, основанная на введении структурных переменных – тензора плотности дефектов (деформация, индуцированная дефектами) p_{ik} и параметра структурного скейлинга δ (отношение среднего размера дефектов к расстоянию между ними), который определяет текущую восприимчивость материала к зарождению и росту дефектов [1]. Данные структурные переменные имеют смысл независимых термодинамических параметров неравновесной системы твердое тело с дефектами и характеризуют многомасштабную поврежденность материала. Термодинамическое состояние твердого тела описывается нелинейным видом потенциала – неравновесной свободной энергии среды с дефектами $F(p_{ik},\delta)$.

Постановка задачи о ударно-волновом нагружении материалов сформулирована в приближении плоского удара и содержит одиннадцать параметров, идентификация которых осуществлялась на основе данных квазистатических и динамических экспериментов по одноосному нагружению образцов ванадия и карбида кремния.

Расчет волновых фронтов на основе уравнений, учитывающих связь механизмов релаксации с кинетикой дефектов, позволил оценить величину динамического предела упругости и описать релаксацию упругого предвестника при распространении упругопластической волны по образцу [2]. Природа механизмов релаксации упругого предвестника в работе связывается с эффектами поглощения энергии при формировании дефектов как новой «фазы» материала. В основе этого лежит нелинейная кинетика зарождения и роста дефектов с выраженными признаками метастабильности при переходе от упругого к пластическому фронту.

Результаты моделирования откольного разрушения находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными и позволили установить увеличение откольной прочности с ростом скорости деформации, что является следствием выраженной локализации поврежденности в условиях лавинообразной кинетики роста дефектов при слабой чувствительности кинетики роста поврежденности к нарастающей амплитуде нагрузки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№14-19-01173).

Литература

1. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 4. – С.45–72.

2. Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Ляпунова Е.А., Разоренов С.В., Наймарк О.Б. Особенности упругопластического перехода и разрушения ванадия при ударно-волновом нагружении // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т.41, вып.12. – С.32–39.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Соковиков М.А., Билалов Д.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б.

ИМСС УрО РАН, д. 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, РоссийскаяФедерация,
e-mail: sokovikov@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому изучению неустойчивости и локализации пластической деформации при динамическом нагружении и высокоскоростном пробивании.

Для теоретического анализа в данном исследовании использовалась ранее разработанная теория, в которой методами статистической физики и термодинамики необратимых процессов изучается влияние микродефектов на пластические свойства твердых тел [1].

Исследовалось поведение образцов в режиме близком к чистому сдвигу при динамическом нагружении на стержне Гопкинсона – Кольского. Для этого были разработаны образцы специальной формы и оснастка, обеспечивающие реализацию плоского деформированного состояния. Исследовались также образцы типа “сдвиг-сжатие”, предложенные в [2]. В режиме реального времени боковая поверхность образцов исследовалась в процессе нагружения с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Полученное распределение температурного поля в различные моменты времени позволило судить о развитии локализации пластической деформации [3].

Проведено изучение пробивания преграды в виде формирования и выноса пробки с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры. На оригинальной баллистической установке по изучению пробивания были исследованы образцы из стали 25ХН3МФС и алюминиевых сплавов, для которых были реализованы режимы импульсного нагружения, сопровождающиеся неустойчивостью пластического течения и выносом пробки.

Получены инфракрасные образы тыльной поверхности образца и распределение температуры на тыльной поверхности образца в процессе внедрения ударника в образец и формирования пробки. Значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают ~190^{0}C, что позволяет сделать вывод о возможности реализации механизма формирования и выноса пробки, не связанных с термопластической неустойчивостью.

В результате численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, получены поля температур на поверхности образцов типа «сдвиг-сжатие» и на тыльной поверхности образцов при формировании и выносе пробки близкие к определенным экспериментально. После эксперимента сохраненные образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического микроскопа-интерферометра NewView-5010 и просвечивающего электронного микроскопа [4]

Данные теоретических и экспериментальных исследований позволяют предполагать, что один из механизмов неустойчивости пластического сдвига и локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении обусловлен структурно- кинетическими переходами в ансамблях микродефектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант № 14-19-01173.

Литература

1. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика, 2004, Т. 6, с. 45–72.
2. Rittel D., Landau P., and Venkert A. // Phys.Rev.Lett. 101, 165501. – 2008.
3. Соковиков М.А, Билалов Д.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации // Письма в Журнал технической физики, 2014, Том.40, Выпуск 23, с.82–88.

4. Ляпунова Е.А., Петрова А.Н., Бродова И.Г., Наймарк О.Б., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В. Исследование морфологии многомасштабных дефектных структур и локализации пластической деформации при пробивании мишеней из сплава А6061// Письма в Журнал технической физики, 2012, Том 38, Выпуск 1, с. 13–20.

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ВТМО

Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д.

ФГБУН Институт механики УрО РАН, д. 34, ул. Т. Барамзиной, г. Ижевск, 426067, Российская Федерация,
e-mail: okа592@rambler.ru

Влияние режимов высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) на уровень механических свойств стали достаточно подробно изучено в работах ведущих российских ученых в этой области [1-4]. Однако определенный интерес представляет влияние схемы обработки на свойства стали 30ХГСН2А и степени деформации при оправочном деформировании труб из стали 38ХС.

По результатам, приведенным в таблице 1 видно, что для стали 38ХС наилучшие механические свойства получены при режимах обработки заготовок со степенью деформации 20, 26 и 30 % и отпусков 200 и 270 °С.

В зависимости от температуры отпуска упрочненных заготовок для стали 38ХС видно, что при понижении температуры отпуска до 200 °С предел прочности возрастает на 128 МПа, предел текучести на 100 МПа при степени деформации 30 %, а ударная вязкость понижается незначительно.

На стали 30ХГСН2А механические свойства получены для упрочненных трубных заготовок, обработанных на степень деформации 25 %. При температуре отпуска 200 °С, рекомендуемой для данной стали, получены удовлетворительные значения прочностных свойств для трубчатых пальцев, рекомендуемых к замене вместо пальцев сплошного сечения, используемых в настоящее время на гусеничных машинах.

Таблица 1 - Механические свойства стали 38ХС от степени деформации при ВТМО и температуры отпуска (опыты 1 - 6) и влияние схемы обработки на свойства стали 30ХГСН2А (опыты: 7 – на длинной оправке, 8 – на короткой оправке)

№ п/п	Марка стали	$t_{отп.}$, °С	λ, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B, МПа	δ, %	Ψ, %	KCU, МДж/м^2	$HRC_э$, ед
1	38ХС	200	20	1586	1812	12,9	46,1	0,36	47…51
2		270	20	1428	1587	10,7	43,0	0,54	
3		200	26	1571	1775	15,3	53,4	0,41	
4		270	26	1448	1631	13,5	55,6	0,64	
5		200	30	1603	1817	13,1	52,5	0,56	
6		270	30	1501	1689	14,9	53,0	0,58	
7	30ХГСН2А	200	25	1721	1879	13,3	63,5	1,11	
8		200	25	1653	1837	14,2	56,0	1,21	

На основании проведенных исследований определены оптимальные технологические режимы упрочнения при ВТМО и последующей термической обработки, по которым изготовлены опытные партии трубных заготовок для пальцев ø 22 мм и ø 30 мм.

Уровень механических характеристик по всем стадиям технологического передела приведен в таблице 2. Обращает внимание возрастание величины конструктивной прочности и ударной вязкости после редуцирования и, особенно, после ВТМО с отпуском.

После редуцирования при неизменной прочности в сравнении с прошивкой значительно возрастает пластичность ψ - на 20 % и, особенно, ударная вязкость – в 1,7 раза. При ВТМО, в сравнении с редуцированием, возрастает как прочность – на 500 МПа, так и пластичность (ψ) – на 25 %.

Уровень конструктивной прочности ($\sigma_в \cdot \psi$) после редуцирования и ВТМО составляет, соответственно, 707,2 МПа и 1153,7 МПа, при значениях ударной вязкости, соответственно, 1,15 и 1,40 Дж/м^2.

Таблица 2 – Механические свойства стали 30ХГСН2А после разных операций металлургического передела

Операция	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	Ψ, %	KCU, Дж/м^2	$\sigma_в \cdot \Psi$, МПа	$HRC_э$
Прошивка	900 908 925 905	1306 1306 1308 1298	19,6 19,2 19,6 18,8	44,1 42,6 42,0 41,8	0,65 0,65 0,71 0,66	575,9 556,4 549,4 542,6	39-38-39 39-38-39 38-39-38 37-38-39
Редуцирование	1066 1098 1100 1094	1363 1359 1381 1348	16,0 14,3 15,8 16,9	52,2 53,2 52,4 53,0	1,07 1,11 1,21 I.2I	711,5 723,0 723,6 714,4	40-39-39 38-39-40 37-38-39 37-37-37
Высокий отпуск (t = 700°C, τ = 2 ч)	762 770 774	935 950 947	21,0 22,0 20,0	64,0 66,0 54,0	1,23 1,00 1,30	598,4 627,0 606,0	53-53-54 51-52-52 49-51-53
ВТМО	1673 I702 1735	1821 1926 1907	8,0 7,0 11,0	57,0 46,0 57,0	1,40 1,40 1,45	I037,9 886,0 1087,0	51-52-52 51-52-52 51-52-51
ВТМО + низкий отпуск, (t = 300°C, τ = 2 ч)	1665 1665 1778	1885 1873 1949	10,6 11,5 9,6	54,0 57,0 58,0	1,23 1,00 1,30	1017,9 1067,6 1130,4	53-53-54 51-52-52 49-51-53

Таким образом, ВТМО полых заготовок, особенно после их редуцирования, значительно повышает конструктивную прочность стали 30ХГСН2А, что в сочетании с высокой ударной вязкостью позволяет предполагать повышенные эксплуатационные характеристики полых пальцев в условиях действия сложных динамических нагрузок.

Литература

1. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. – в 2-х т. – М.: Металлургия, 1968. – 1171 с.
2. Бернштейн М.Л. Прочность стали.- М.: Металлургия, 1974.- 200 с.
3. Бернштейн М.Л. и др. Влияние режимов темомеханической обработки на свойства рессорной стали. – В кн.: Повышение прочности и долговечности деталей машин.- Ижевск: Ижевский механический институт, 1972. С. 3–13.
4. Дементьев В.Б., Засыпкин, А.Д. Исследование структуры и механических свойств стали 30ХГСН2А в технологиях прошивки, редуцирования и высокотемпературной термомеханической обработки особотолстостенных трубных заготовок / В.Б. Дементьев, А.Д. Засыпкин // Химическая физика и мезоскопия. – 2015. – Т. 17, № 3. – С. 372–379.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА УПЛОТНЕНИЕ НЕКОМПАКТНОГО ТИТАНОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

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

Институт машиноведения УрО РАН (ИМАШ УрО РАН), д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: berezin.e-mail@yandex.ru

Интенсификация механизма уплотнения порошкообразных металлических материалов существенно зависит от выбора эффективной схемы деформации, обеспечивающей снижение энергосиловых параметров процесса при увеличении плотности компактируемой заготовки. Известно, что достижение высоких плотностей деформируемой среды возможно только в процессах, реализующих оптимальные комбинации нормальных и касательных напряжений [1]. При этом резервы повышения плотности, например, в таком распространенном процессе как одноосное компактирование можно считать исчерпанными. В связи с этим решение проблемы повышения плотности заготовок из некомпактных материалов следует ожидать на основе комплексного анализа влияния напряженного состояния на уплотнение и совершенствовании существующих процессов нагружения. Обзор известных литературных источников показал, что зависимости, устанавливающие связь между давлением прессования и плотностью порошкового материала, в основном относятся только к тем схемам деформации для которых они были получены [2–4]. Таким образом, определение единой закономерности изменения плотности материала в зависимости от величины касательных и нормальных напряжений при различных схемах деформирования является актуальной задачей. Наиболее полную информацию о процессе уплотнения материала можно получить с использованием процессов трехосного нагружения [5–8]. Особенностью экспериментального оборудования подобного типа является возможность обеспечивать различное напряженное состояние в заготовке путем приложения радиального и осевого давления независимо друг от друга. При этом измерение плотности возможно только после извлечения образцов из камеры и восстановления их размеров вследствие полного прохождения процесса упругого последействия. Сложность проведения экспериментов, низкая производительность установок трехосного сжатия делают такой подход дорогостоящим и малоэффективным. В данной работе предпринята попытка заменить физический эксперимент трехосного нагружения порошкообразного титаносодержащего сырья численным моделированием для определения количественной закономерности уплотнения материала в зависимости от комбинации первого и второго инвариантов тензора напряжений.

В качестве материала исследования использован отсев титановой губки, подвергнутый термоводородной обработке [9]. Для описания условия перехода материала из упругого состояния к предельному напряженному применена модифицированная модель текучести Друкера – Прагера реализованная в пакете конечно-элементного анализа Abaqus. Для идентификации параметров принятого условия текучести использована концепция представительного элемента, в соответствии с которой поведение порошка на макроскопическом уровне можно заменить рассмотрением элемента правильной кубической упаковки частиц. При этом предполагается, что каждая частица в упаковке имеет форму шара. Суть данного подхода сводится к определению точек необходимых для построения кривой текучести путем моделирования пластической деформации ячеек представительного объема на основе применения численных методов.

В результате компьютерного моделирования процесса трехосного нагружения получены значения пористости в различном напряженном состоянии при определенной величине интенсивности напряжений и среднего нормального напряжения порошкового материала. Показано, что на уплотнение материала наиболее существенное влияние оказывают средние нормальные напряжения σ, причем при достижении значений σ больших четырех пределов текучести компактного материала повышение давления не приводит к заметному уменьшению пористости. При этом в случае отсутствия сдвигающих напряжений пористость порошкового материала не может быть достигнута менее 6%. Адекватность полученного уравнения

регрессии опробовали путем сравнения с экспериментом по компактированию отсева титановой губки в закрытой пресс-форме. Определение пористости в представительных зонах сечения брикета выполнялось с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega II XMU с последующим анализом и обработкой изображений. Сравнение значений пористости, полученных путем компьютерного моделирования и эксперимента позволяет сделать вывод об удовлетворительной сходимости результатов исследования.

Литература

1. Баглюк Г.А. Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций // Реологія, структура, властивості порошкових та композиційних матеріалів: збірник наук. праць. – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2004. – С. 35–48.
2. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Демин В.А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. М.: ФИЗМАЛИТ, 2009.
3. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004.
4. Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Первухина Д.Н. Моделирование в программном комплексе Abaqus процесса компактирования пористого материала // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2015. No. 6. С. 45–48.
5. Буланов В.Я., Лаппо И.С., Анциферов В.Н., Перельман В.Е., Талуц Г.Г. Гидростатическое формование порошков. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1995.
6. Sinka I.C., Cocks A.C.F. Constitutive modelling of powder compaction – II. Evaluation of material data // Mechanics of materials. 2007. No. 39. P. 404–416.
7. Sridhar I., Fleck N.A. The multiaxial yield behavior of aluminium alloy foam // Journal of Materials Science. 2005. Vol. 40. No. 15. P. 4005–4008.
8. Procopio A.T., Zavaliangos A. Simulation of multi-axial compaction of granular media from loose to high relative densities // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2005. Vol. 53. No. 7. P. 1523–1551.
9. Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Zalazinskii A.G., Skripov A.V. Influence of temperature on compactibility of briquettes of titanium sponge alloyed with hydrogen // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2015. Vol. 56. No. 3. P. 287–292.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДИКИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПЛАНЕТАРНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ТИПА K-H-V И ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ НЕБОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ

Ражиков В.Н., Беляев А.Н.

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф.Устинова, д. 1, 1-я Красноармейская ул., г. Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, e–mail: AlNikBel@yandex.ru

Гарантированный срок службы современных приводов космической техники с мелкомодульными зубчатыми передачами превышает 50 тыс. ч. Аналоги подобных приводов, хорошо зарекомендовавшие себя в эксплуатации, обычно отсутствуют. В настоящее время отсутствуют также и надёжные методы расчёта ресурса мелкомодульных зубчатых передач. Это заставляет заниматься разработкой экспериментальных методов подтверждения ресурса приводов (методов ускоренных ресурсных испытаний).

В данном докладе излагаются принципы построения методики ресурсных испытаний планетарных зубчатых передач типа K-H-V и волновых зубчатых передач, работающих при небольших скоростях вращения.

Ресурсные испытания необходимо построить так, чтобы в исследуемой передаче проходили те же процессы, что и в эксплуатируемой. Кроме того, для ускорения времени проведения испытаний требуется интенсифицировать процессы сопровождающие работу за счёт форсирования отдельных параметров нагружения, но при этом они не должны претерпевать качественных изменений.

Проведённые исследования показали, что работоспособность рассматриваемых зубчатых механических передач, в основном, определяется тремя процессами.

1. Колебания звеньев передачи, определяющие действующую нагрузку между сопряженными поверхностями.

Вследствие погрешностей изготовления деталей, входящих в конструкцию передачи, в зацеплении зубьев возникают дополнительная динамическая нагрузка. При этом, если динамическая нагрузка превысит величину статической, то в зацеплении возникают соударения и работа зацепления не будет соответствовать той, которая должна быть при эксплуатации.

Так как динамическая нагрузка в зацеплении зависит от частоты вращения деталей передачи, то форсирование частоты вращения входного вала можно увеличивать только до определённого критического значения.

2. Процессы, создающие условия для формирования смазочной пленки, разделяющей поверхности трения.

При проведении ускоренных ресурсных испытаний необходимо, чтобы форсирование параметров нагружения не приводило к изменению режима смазывания, которое имеет место при эксплуатации передачи. В контакте профилей зубьев рассматриваемых передач взаимодействуют сопряженные несовпадающие поверхности с начальным касанием по линии, а применяемый смазочный материал является пластичным. В этом случае вид смазывания лучше всего определять по зависимости Доусона-Хиггинсона и критерию Герси-Штрибека. После проведения соответствующих расчётов при нормальном и при форсированном режимах, сравнивались условия образования смазочной пленки и были найдены выгодные параметры нагружения для проведении ускоренных ресурсных испытаний.

3. Повреждения соприкасающихся поверхностей зубьев.

Для оценки повреждений соприкасающихся поверхностей было принято использовать отношение числа пластически деформированных микронеровностей к общему их числу на единице площади поверхности ξ. Параметр ξ определялся для нормального режима работы и на каждом из предполагаемых режимов ускоренных испытаний. Для расчетов использовалась модель взаимодействия шероховатой поверхности с гладкой плоскостью, разработанная Гринвудом и Вильямсоном.

Получив в результате проведённых расчётов критическую частоту вращения входного вала, оценив условия образования смазочной пленки и параметры повреждаемости соприка-

сающихся поверхностей зубьев, была получена сравнительная оценка утраты работоспособности на различных режимах работы передачи и произведен выбор режимов проведения ускоренных испытаний. Таким образом, удалось добиться сокращения времени проведения испытаний в ~ 30 раз.

СТРУКТУРА ЧАСТИЦ ДЕТОНАЦИОННОГО НАНОАЛМАЗА

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

Алтайский государственный университет, д. 90, пр. Красноармейский, г. Барнаул, 656049, Российская Федерация, e–mail: plotnikov@phys.asu.ru

Особое место в исследовании углеродных наноструктур принадлежит детонационным наноалмазам, синтезированным из углеродсодержащих взрывчатых веществ. В настоящее время наноалмазы находят все большее практическое использование [1]. Однако особенности структуры как наноалмазного ядра, так и примесной оболочки недостаточно изучены, что ограничивает возможности применения этого вида наноалмазов.

Объектом исследования являются детонационные наноалмазы, полученные по взрывной технологии.

Электронно-микроскпические исследования показали, что кристаллы наноалмазов имеют совершенную монокристаллическую структуру (рис. 1) [2]. Дефекты строения обнаружены лишь в крупных (более 10 нм) кристаллах, и представлены такими дефектами как: границы субзерен, фасетированные грани, дефекты упаковки. Также на изображении можно выделить и не кристаллическую составляющую детонационного наноалмаза, расположенную по периферии нанокристаллов.

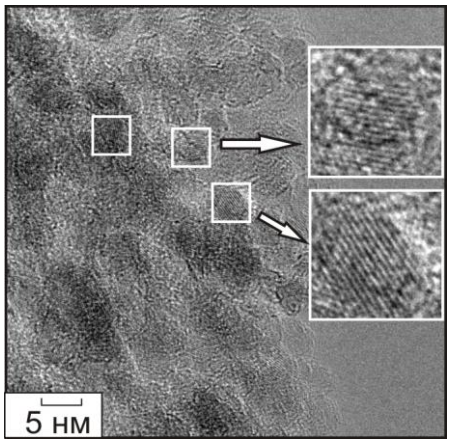


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение кристаллов детонационного наноалмаза

Данные рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о хорошей корреляции кристаллографических параметров детонационного наноалмаза и крупнокристаллического алмаза. Из этого можно заключить, что решетка кристалла наноалмаза не подверглась существенному изменению в наносостоянии.

Диффузный фон, в области малых углов наблюдаемый на рентгенограмме наноалмаза (рис. 2) связан с присутствием в структуре наночастиц примесных молекулярных комплексов, не имеющих кристаллического строения [3].

Проведенные расчеты, с использованием уравнения Гинье $I(s)=I_0\exp(-s^2r_q^2/3)$, показали, что в наноалмазе присутствуют примесные молекулярные комплексы с размерами r_1 = 2,2± 0,4 нм и r_2=1,2± 0,3 нм.

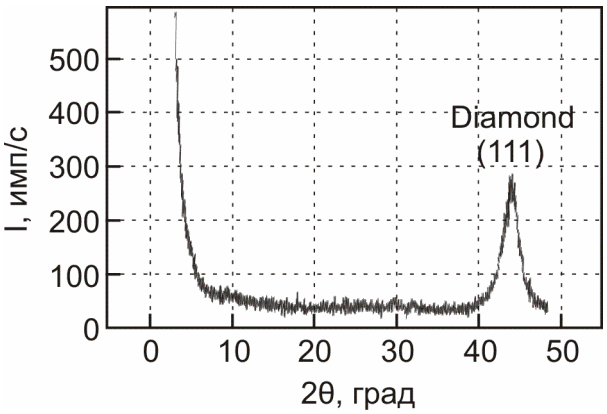


Рис. 3. Диффузный фон рентгеновского рассеяния примесных комплексов детонационного наноалмаза

Элементный микроанализ выявил наличие в детонационном наноалмазе большого количества примесных атомов, к основным из которых можно отнести: кислород, железо, серу, кальций, алюминий.

Исследование летучей компоненты примесного слоя частиц детонационного наноалмаза, проведенное с использованием синхронного термического и масс-спектрометрического анализа (рис. 3) показало, что при нагреве наноалмаза его масса уменьшается примерно на 20 %.

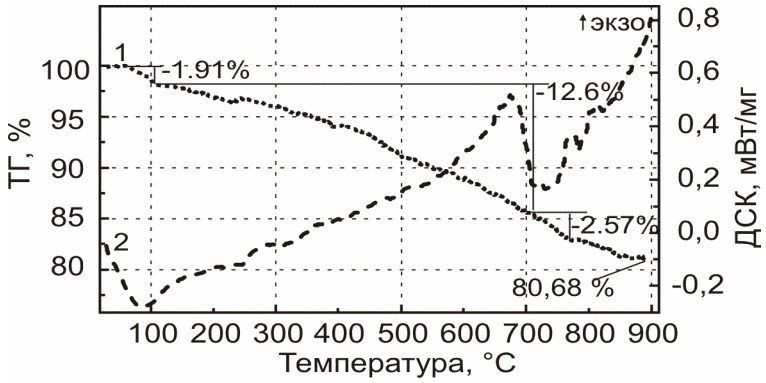


Рис. 4. Изменение массы (1) и тепла (2) в ходе нагрева детонационного наноалмаза

Убыль массы сопровождается выделением летучих соединений, таких как: H_2O, CH_4, H_2S, O, SO_2, N_2, CO_2, H_2 [4].

Таким образом, на основании экспериментальных данных, можно представить следующую модель структурного состояния частицы детонационного наноалмаза. Наночастица состоит алмазного наноядра с идеальной кристаллической структурой и оболочки из примесей. Примесная оболочка имеет сложную иерархическую структуру, каждый уровень которой отличаются характером взаимодействия с наноалмазным ядром. На поверхности наноядра находится слой гетероатомов, сильно связанных с ядром [5]. Периферия примесной оболочки состоит из молекулярных комплексов, имеющих Ван-дер-Ваальсовский характер взаимодействия с алмазным наноядром.

Литература:

1. Vadym N. Mochalin, Olga Shenderova, Dean Ho and Yury Gogotsi The properties and applications of nanodiamonds // Nature Nanotechnology, 2012, Volume 7, Pages 11–23

2. В.А. Плотников, Б.Ф. Демьянов, С.В. Макаров, А.Г. Черков Атомная структура нанокристаллов детонационного алмаза // Фундаментальные проблемы современного материаловедения, 2012, № 4, С. 521–526.

3. В.А. Плотников, С.В. Макаров, Д.Г. Богданов Структурное состояние примесной подсистемы детонационного наноалмаза // Фундаментальные проблемы современного материаловедения – 2015. – Т. 12. – № 2. – С. 183–187.

4. Д.Г. Богданов, С.В. Макаров, В.А. Плотников Десорбция примесей при нагреве детонационного наноалмаза // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – В. 4. – С. 89–95.
5. В.А. Плотников, Д.Г. Богданов, С.В. Макаров Детонационный наноалмаз: моногр. Барнаул : изд-во АлтГУ, 2014. – С. 224.

МАГНИТОУПРУГОЕ РАЗМАГНИЧИВАНИЕ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф.

ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация, e-mail: muratows@mail.ru

В последнее время все большее внимание уделяется определению усталостных свойств сталей магнитными методами, например [1-4]. В работе предлагается к обсуждению использование параметров релаксации напряженности магнитного поля рассеяния H_p остаточной намагниченности сталей с ростом числа циклов нагружения.

В первом приближении, механическое воздействие нагрузками ниже предела выносливости σ_{-1}, не приводит к деградационным процессам в металле. В этом случае намагниченный образец вследствие изменения магнитоупругой энергии изменяет энергетический баланс доменов, в результате доменная структура меняется, происходит размагничивание стали. Последующие нагружения и разгружения всякий раз приближают систему доменов (междоменных границ) к некоторому энергетически устойчивому состоянию при заданной амплитуде нагружения. В случае превышения нагрузки выше σ_{-1}, приводящей к появлению дефектов кристаллической решетки можно ожидать изменения либо самого характера релаксации намагниченности, либо его параметров. Следовательно, выявление начала такого изменения может свидетельствовать о величине σ_{-1}. **Целью** работы явилось изучение возможности неразрушающим методом оценивать критические параметры металла, чувствительные к зарождению деградационных процессов в нем.

Испытания были выполнены на трех образцах стали канадского производства (близкий аналог 17Г1С-У), предназначенной для изготовления штока штангового глубинного насоса. Проводились малоцикловые испытания на растяжение с последовательным повышением амплитуды на 50МПа после каждой серии из ста циклов. Перед каждой серией выполнялось намагничивание образца до насыщения, в процессе циклирования синхронно регистрировали H_p образца, пропорциональную намагниченности. На рисунке 1 в долях величины начальной напряженности магнитного поля остаточной намагниченности H_r представлен характер первых двадцати пяти циклов изменения H_p. Здесь $h_p=H_p/H_r$.

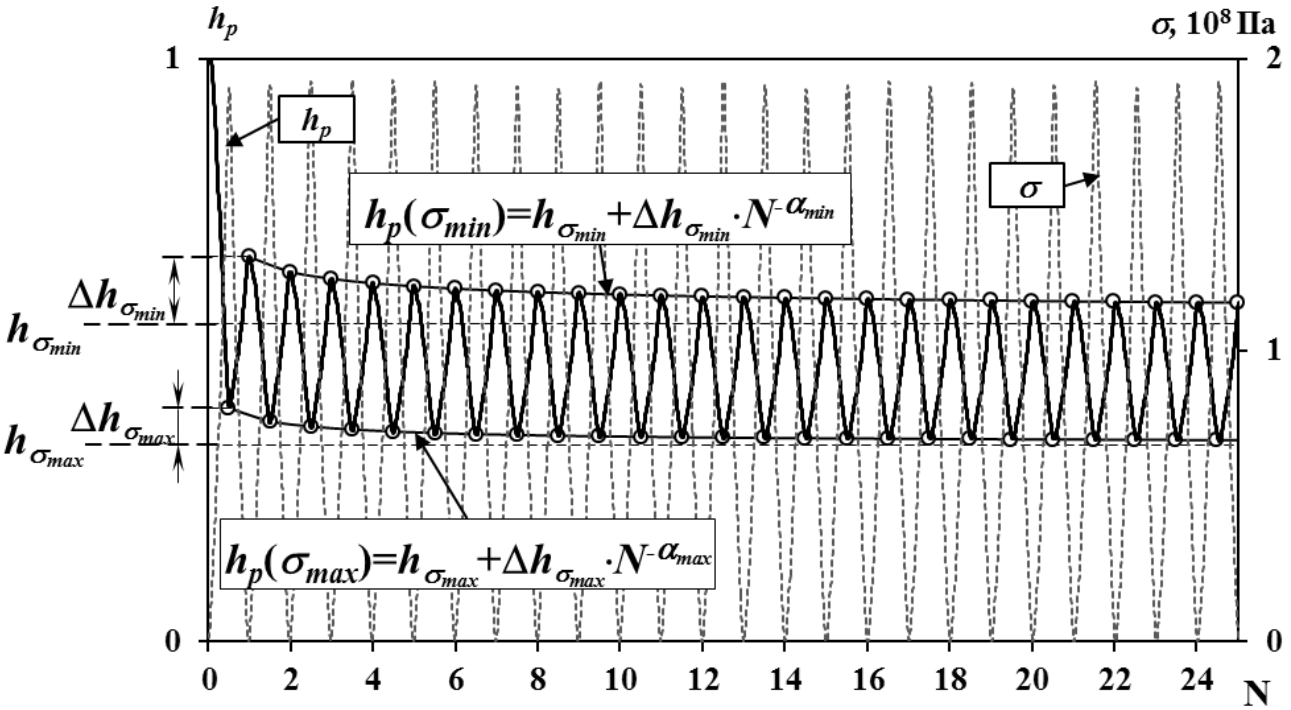


Рис. 1. Магнитоупругая циклограмма

Анализ полученных данных показал, что пиковые значения h_p, соответствующие амплитудной нагрузке (σ_{max}) или ее отсутствию (σ_{min}) плохо аппроксимируются экспонентой и хорошо могут быть аппроксимированы степенным уравнением.

$$h_p(\sigma_{max}, \sigma_{min}) = h_{(\sigma_{max},\sigma_{min})} + \Delta h_{(\sigma_{max},\sigma_{min})} \cdot N^{-\alpha_{(\sigma_{max},\sigma_{min})}}, \quad (1)$$

где: $h_{(\sigma_{max},\sigma_{min})}$, $\Delta h_{(\sigma_{max},\sigma_{min})}$, $\alpha_{(\sigma_{max},\sigma_{min})}$ – эмпирические параметры, N – номер цикла.

Величина $h_{(\sigma_{max},\sigma_{min})}$ отражает устойчивое состояние магнетика при N→∞, $\Delta h_{(\sigma_{max},\sigma_{min})}$ – величина сползания. Показатель степени $\alpha_{(\sigma_{max},\sigma_{min})}$ отвечает за быстроту необратимого размагничивания с ростом номера цикла. Зависимость параметров h, Δh, α от амплитуды нагружения имеет сложный характер и на первый взгляд различная для каждого из образцов, однако обращает на себя внимание отношение $\delta h = \Delta h_{\sigma_{min}} / \Delta h_{\sigma_{max}}$, зависимость которого от амплитуды нагрузки представлена на рисунке 2.

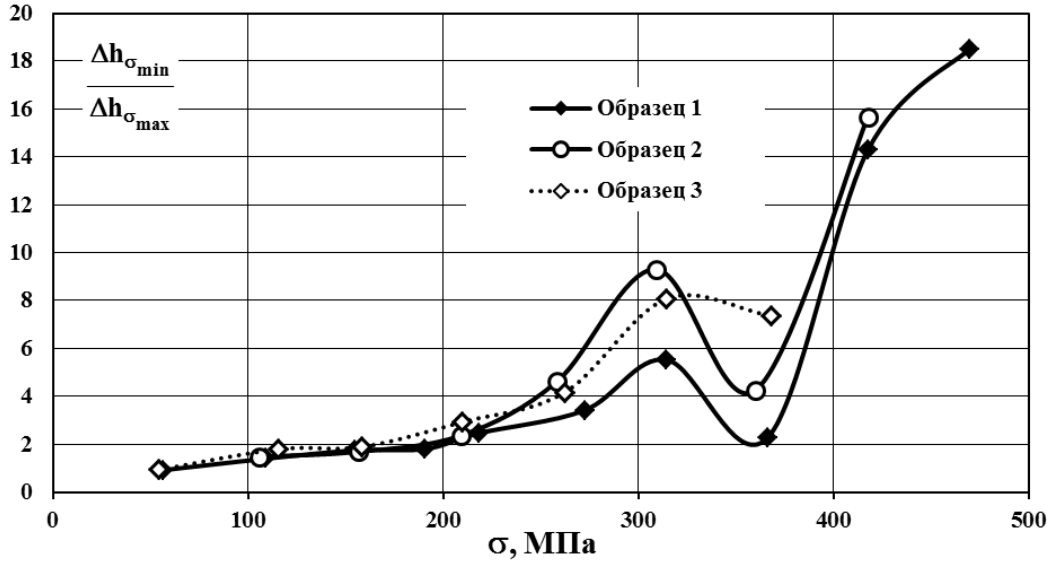


Рис.2. Зависимость отношения $\Delta h_{\sigma_{min}} / \Delta h_{\sigma_{max}}$ от амплитуды нагружения для трех образцов

Из рисунка видим, что в начале δh имеет практически одинаковые значения для трех образцов и линейно растет. В области 250÷350МПа наблюдается локальный максимум. Согласно связи [5] условного предела текучести и твердости, оценочное значение σ_{-1} ≈300 МПа.

Вывод:

Наблюдаемый факт дает возможность предположить возможность оценки предела выносливости по результатам анализа магнитоупругой циклограммы, и возможно оценивать остаточный ресурс неразрушающим методом.

Литература

1. Magnetic Techniques for Estimating Elastic and Plastic Strains in Steels under Cyclic Loading [Electronic resource] / E. S. Gorkunov, R. A. Savrai, A. V. Makarov, S. M. Zadvorkin // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 2. – P. 6–15. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.2.006-015. URL: http://dream-journal.org/issues/2015-2/2015-2_20.html.

2. Новиков В.Ф., Семенов В.В., Бахарев М.С., Исаков В.В. О возможности неразрушающего определения предела выносливости стали 20Н2М//Дефектоскопия. 2006. № 3. С. 65–71.

3. Новиков В.Ф., Кулак С.М., Муратов К.Р., Мацура О.К. Прогнозирование усталостного разрушения металла трубопровода//Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2010. № 3. С. 70–74.

4. Новиков В.Ф., Дягилев В.Ф., Бахарев М.С., Нассонов В.В., Прилуцкий В.В. Закономерности магнитоупругого изменения локальной остаточной намагниченности сталей//Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 6. С. 34–37.

5. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник Ч.1. Киев: Наукова думка, 1987 – 505 с.

СТУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОЭРРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ TiC-Mo, СФОРМИРОВАННОГО НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

Романов Д.А.[1*], Гончарова Е.Н.[1], Громов В.Е.[1], Иванов Ю.Ф.[2]

[1]*Сибирский государственный индустриальный университет, д. 42, ул. Кирова, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация*

[2]*Институт сильноточной электроники СО РАН, д. 2/3, пр.. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

**e-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru*

Цель работы – исследование структуры, фазового состава и износостойкости покрытия на основе TiC-Mo, сформированного на стальной подложке комбинированным методом.

Материал исследования - покрытие на основе TiC-Mo, сформированное комбинированным методом: электровзрывное напыление (ЭВН) и последующую обработку высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (ЭПО) на установке СОЛО (ИСЭ СО РАН). Исследование фазового состава и дефектной субструктуры покрытия осуществляли методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии.

Покрытия, сформированные ЭВН, является многослойным и характеризуется высокоразвитым рельефом. ЭПО в режиме плавления поверхностного слоя приводит к выглаживанию поверхности облучения и формируется поверхностный слой с островковой структурой, в объеме которых часто выявляется субмикрокристаллическая структура.

Толщина сформированного покрытия - 20-50 мкм. Микропоры и микротрещины в нем и в переходном слое покрытие-сталь не выявляются. Электронная микроскопия выделяет как минимум 3 подслоя с различной микроструктурой, которая выявляется и в приповерхностном объеме подложки, примыкающем к покрытию.

Исследования показывают, что выявленные слои отличаются не только микроструктурой, но и элементным составом. Анализируя результаты, можно отметить, что элементы напыляемого покрытия по толщине модифицированного слоя распределены некоторым определенным образом: слои, обогащенные атомами молибдена и титана чередуются со слоями, обогащёнными атомами углерода.

Фазовый состав и дефектную субструктуру покрытия анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. Анализируя слой покрытия, расположенный на глубине ≈15 мкм, выявлено, что основной фазой покрытия является твердый раствор на основе α-железа (α-фаза, ОЦК кристаллическая решетка). Дополнительными фазами покрытия, выявленными при индицировании микроэлектронограмм, являются карбиды на основе титана (TiC) и молибдена (Mo_2C).

Дефектная субструктура α-фазы разнообразна. Выявляются области с полосовой субструктурой, области с ячеистой субструктурой и области с сетчатой субструктурой.

Включения второй фазы в основном распределены квазиравномерно по объему исследуемой фольги. Размеры частиц изменяются в пределах от 15 нм до 100 нм. В отдельных случаях выявляются участки материала, в которых обнаруживаются скопления частиц второй фазы. Частицы имеют глобулярную форму; размеры частиц изменяются в пределах (50-100) нм. Анализ микроэлектронограмм дает основание заключить, что данные частицы являются карбидом титана состава TiC. Принимая во внимание компактное расположение частиц карбида титана, можно предположить, что такие области сформировались в результате внедрения в поверхностный слой стали частиц исходной порошковой навески.

Прочностные характеристики покрытия анализировали, определяя величину твердости методами нанотвердометрии. Одновременно с нанотвердостью была определена величина модуля Юнга. Анализ результатов показывает, что сформированное на поверхности стали покрытие на основе системы TiC-Mo характеризуется сравнительно низкими значениями износостойкости и более высокими значениями коэффициента трения по отношению к подложке. Низкие значения износостойкости могут быть объяснены эффектом саморазрушения

твердого покрытия в результате выкрашивания частиц карбидной фазы в процессе испытания на износостойкость.

Таким образом, комбинированным методом, сочетающим ЭВН и последующую ЭПО, на поверхности стали сформировано многослойное многофазное покрытие на основе системы TiC-Mo, характеризующееся высокими значениями твердости. Показано, что высокие прочностные характеристики покрытия обусловлены присутствием наноразмерных частиц карбидной фазы на основе титана и молибдена.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60032 мол_а_дк и при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4166.2015.2, госзаданий Минобрнауки № 2708 и 3.1496.2014/К на выполнение научно-исследовательских работ, в центре «Материаловедение» СибГИУ. Выбор оптимальных режимов и облучение поверхности покрытий высокоинтенсивным импульсным электронным пучком на установке СОЛО выполнено за счет гранта РНФ (проект № 14-29-00091).

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С РАЗВИТОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ И НЕПРЯМОМ РАСТЯЖЕНИИ

Токтогулов Ш.Ж., Зайцев Д.В., Панфилов П.Е.

Уральский федеральный университет, Институт естественных наук, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация, e-mail: toksham@mail.ru

Введение. Горные породы являются трудными объектами для исследования, поскольку они имеют неоднородную иерархическую структуру и сложный фазовый состав, из-за чего их прочностные свойства оказываются зависимыми от многих, часто неконтролируемых факторов [1]. Одна из которые остаются нерешёнными, разделение вкладов таких каналов релаксации упругой энергии, как обратимая и необратимая деформация и разрушение в механические свойства. Механические испытания горных пород на стандартных образцах требуют значительных материальных затрат и дорогостоящего оборудования. В следствие чего, использование малогабаритных лабораторных образцов могло бы существенным образом ускорить и удешевить проведение исследований. Поэтому целью настоящей работы является разработка и апробирование методики приготовления малогабаритных образцов из прочных магматических горных пород и изучение их деформационного поведения при одноосном сжатии и диаметральном сжатии при комнатной температуре на воздухе.

Материалы и методы. В качестве модельных материалов были выбраны такие горные породы магматического происхождения как серпентинит (змеевик), уральская яшма и розовый гранит.

Образцы для испытаний в форме дисков высверливали полым алмазным сверлом (внутренний диаметр 6 мм) из плоскопараллельных пластинок толщиною 5 мм. Рабочие поверхности образцов шлифовали на алмазном круге под водным орошением до толщины 2 мм. До и после испытаний образцы фотографирова.

Испытания на одноосное сжатие и диаметральное сжатие [2] (см. рисунок 1, где $\sigma=\frac{2F}{\pi Dh}$, $\varepsilon=\frac{\Delta x}{D}$.) проводили на электромеханической испытательной машине Shimadzu™ AG-50KN со скоростью перемещения траверса 1мм/мин при комнатной температуре. Трещины, возникающие в образцах при испытании, изучали на металлографическом микроскопе МИМ-8М.

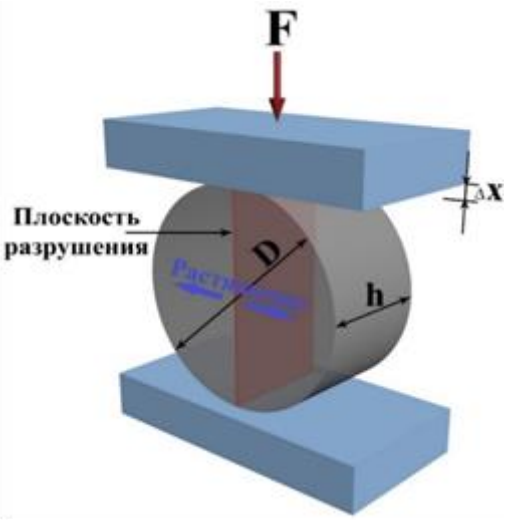


Рис. 1. Схема испытаний на диаметральное сжатие

Результаты экспериментов и их обсуждение. Одноосное сжатие образца прекращали, как только на деформационной кривой появлялся резкий изгиб, соответствующий появлению трещины в образце. Характерные деформационные кривые при одноосном сжатии для каждой горной породы приведены рисунке 2, а механические свойства образцов сведены в таблицу 1. Ход деформационных кривых всех горных пород оказался подобным, разница состояла только в величине деформации до начала разрушения и предела прочности при сжа-

тии. После остановки испытания наблюдалось диспергирование поверхностного слоя образца, однако полного его разрушения не происходило (рисунок 3).

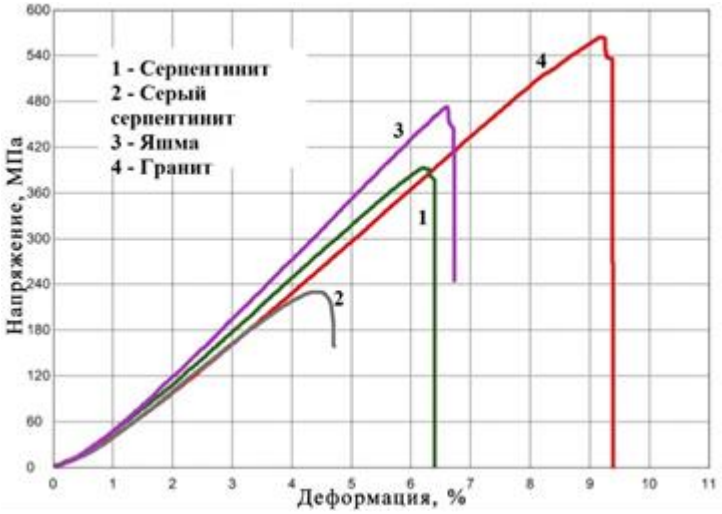


Рис. 2. Деформационные кривые модельных горных пород при одноосном сжатии

Таблица 1 – Механические свойства малогабаритных образцов из горных пород

Материал	E, Гпа	$\sigma_{0.2}$, МПа	$\sigma_в$,Мпа	δ, %
Одноосное сжатие				
Серпентинит	6,43±0,62	376±32	376±32	6,2±0,6
Серпентинит серый	6,10±0,35	212±32	216±27	4,2±0,3
Яшма	7,44±0,25	464±34	464±34	6,8±0,2
Гранит	6,81±0,43	554±32	554±32	9,5±1,4
Диаметральное сжатие				
Серпентинит	2,77±0,59	25,4±5,4	25,4±5,4	1,6±0,2
Серпентинит серый	1,47±0,06	13,5±1,4	13,5±1,4	1,0±0,1
Яшма	2,98±0,32	28,1±1,5	28,1±1,5	1,2±0,1
Гранит	1,46±0,15	14,7±3,8	14,7±3,8	1,1±0,2

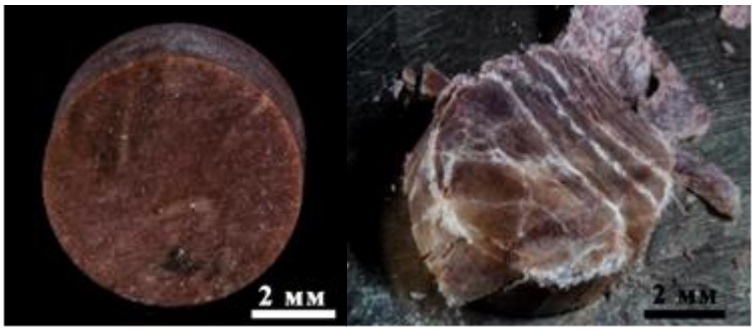


Рис. 3. Образцы яшмы до и после одноосного сжатия

Деформационные кривые образцов горных пород при диаметральном сжатии приведены на рисунке 4, а механические свойства представлены в таблице 1. Образцы из яшмы и гранита всегда распадались на две части, что указывает на хрупкий характер их поведения. Трещины в граните и яшме имеют острые вершины и малые углы раскрытия, а их ширина вблизи вершины практически не отличается от ширины трещины вдали от нее. Напротив, у трещин в серпентините значительно больший угол раскрытия, чем в яшме и граните.

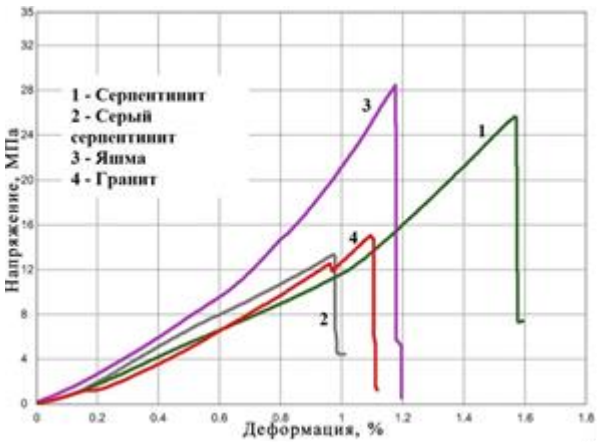


Рис. 4. Деформационные кривые серпентинита, гранита и яшмы при диаметральном сжатии

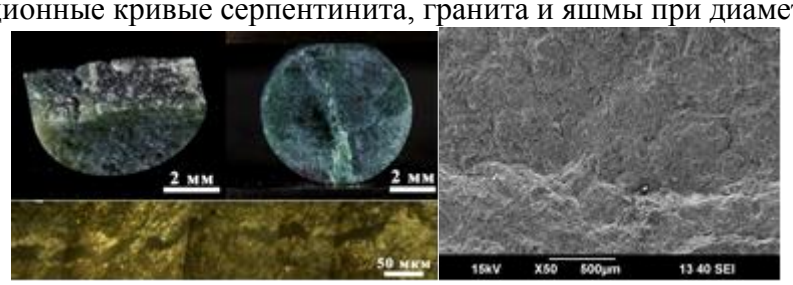


Рис. 5. Разрушение и поверхность излома серпентинита при диаметральном сжатии

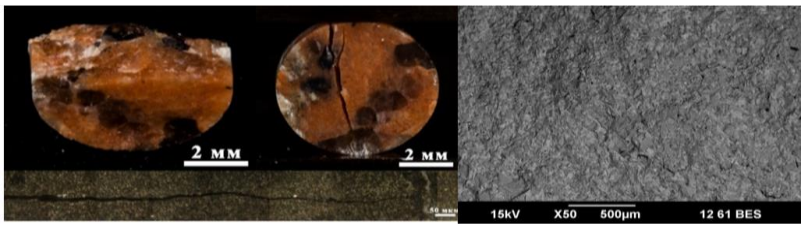


Рис. 6. Разрушение и поверхность излома розового гранита при диаметральном сжатии

Работа выполняется при финансовой поддержке РНФ (грант № 15-19-10007).

Литература

1. Hudson, J. A. Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the Principles, Vol. 1 / J. A. Hudson, J. P. Harrison // Pergamon – 2000. – Amsterdam, 445.

2. Briševac Z. Current Cognition of Rock Tensile StrengthTesting By Brazilian Test/ Zlatko Briševac, Trpimir Kujundžić, Sandi Čajić// The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin. – 2015. – P. 101 – 114.

УДК 620.179.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Сыч Т.В., Бехер С.А.

Сибирский государственный университет путей сообщения, д. 191, ул. Дуси Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация, e-mail: tatyna979@mail.ru, beher@stu.ru

Ключевые слова: Акустико-эмиссионный контроль, преобразователь акустической эмиссии, калибровка, амплитудно-частотная характеристика, чувствительность

Для калибровки измерительного тракта акустико-эмиссионной аппаратуры, в том числе преобразователей, установлены различные требования к опорным источникам АЭ-сигнала [1-5], для возбуждения которого используются дискретные источники АЭ в виде излома графитового стержня или капиллярной стеклянной трубки [4, 5]. Источники такого типа предназначены для исследования импульсной характеристики преобразователя. При калибровке на объекте контроля импульсный источник имеет ограниченное применение, связанное с зависимостью параметров сигналов от месторасположения и ориентации. Для калибровки акустического тракта на объекте контроля, перспективно использовать широкополосные непрерывные акустические сигналы, которые позволяют оценить чувствительность акустического тракта в рабочем диапазоне частот преобразователя.

Целью работы является совершенствование методов и средств калибровки преобразователей акустической эмиссии и исследование их метрологических характеристик непосредственно на объекте контроля.

Исследование характеристик преобразователей акустической эмиссии проводилось способом относительной калибровка с использованием источника непрерывного случайного шума. Экспериментально получены характеристики преобразователя типа GT-300, которые соответствуют паспортной характеристике с погрешностью не более 6 дБ. Исследования выполнены на плоском объекте толщиной 8 мм и литом объекте сложной формы – боковой раме грузового вагона. Используя в качестве эталонного преобразователя GT-300 и возбуждая непрерывные сигналы трением, экспериментально получены амплитудно-частотные характеристики для преобразователей типа ПП-0,1-0,7 и оригинального преобразователя собственной конструкции. Для контроля параметров шума использовалась автокорреляционная характеристика эталонного преобразователя.

Для абсолютной калибровки преобразователей использовались сигналы, возбуждаемые ударным воздействием сферическим объектом с известными параметрами. Подобные источники позволяют получить более стабильные акустические сигналы с постоянной амплитудой, направленностью и частотным распределением. Для контроля параметров ударного воздействия регистрировали деформации материала в области удара с использованием быстродействующей тензометрической системы «Динамика-3» с частотой дискретизации 64 кГц.

Выводы. Экспериментально получены амплитудно-частотные характеристики преобразователей в реальных условиях эксплуатации, которые в целом соответствуют паспортным данным преобразователей. Исследовано изменения амплитудно-частотной характеристики акустического канала измерительной аппаратуры для плоских объектов и объектов сложной формы. Предложена и экспериментально исследована методика абсолютной калибровки преобразователей акустической эмиссии с использованием ударного воздействия и быстродействующей тензометрии.

Литература

1. E 1106-86 Standard Method for PRIMERY CALIBRATION OF ACOUSTIC EMISSION SENSORS. ASTM.
2. ISO 12713, Non-Destructive Testing - Acoustic Emission Inspection – Primary Calibration of Transducers.
3. ГОСТ Р 52727-2007 Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. – Введ. 2007-10-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 18 с.

4. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов, РД 03-300-99, 01.10.1999 г.

5. Муравьев, В.В. Физические основы и технологии акустико-эмиссионного контроля на железнодорожном транспорте / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева / учебн. пособие // Ижевск, 2014. – 398 с.

6. Петерсен, Т.Б. Акустическая эмиссия при соударении твердых тел. Часть 1 / Контроль. Диагностика. – 2010. – № 2. – С. 18–24.

ПОЛУЧЕНИЕ ZrO_2-ГРАФЕН НАНОКОМПОЗИТА МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Солис Н.В.[1], Перетягин П.Ю.[1], Селезнев А.Е.[1], Торресильяс Р. [1,2]

[1] *Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», д.1, Вадковский пер. 127994, Российская Федерация*

[2] *Исследовательский (CINN) (CSIC-Universidad de Oviedo), 33940 El Entrego, Principado de Asturias, Spain*

Стабилизированный иттрием оксид циркония является широко используемым керамическим материалом из-за его превосходных свойств, таких как высокая прочность, твердость и трещиностойкость. После спекания в нормальных условиях чистый и высокоплотный оксид циркония имеет белый цвет. Из-за данной особенности, многие исследования в данный момент направлены на изменение цвета циркониевой керамики. В частности, черный цвет наиболее привлекателен для различных изделий с высокой добавочной стоимостью, например таких как искусственные ювелирные изделия, люксовые часы, оптические устройства, оптоволоконные изделия и PVD мишени. Большинство коммерчески доступной черной керамики из оксида циркония получено путем добавления от 2 до 10 вес.% черного пигмента, например $CoFe_2O_4$ в исходный порошок оксида циркония и последующего спекания материала в интервалах температур от 1400 ºС до 1600 ºС.

В большинстве изделий из черной керамики наличие таких металлических включений как Co и Fe, невозможно из-за условий работы изделий, например из-за наличия аллергии на Co и др. Также коммерчески доступные материалы не электропроводны и не могут быть обработаны при помощи методов электроэрозионной обработки.

С другой стороны, оксид циркония имеет очень низкий коэффициент теплопроводности, что ограничивает максимальные геометрические размеры изделий, которые могут быть изготовлены используя стандартные методы обработки. Инновационные методы спекания, такие как горячее прессование, также имеют ограничение на максимальную высоту спекаемых образцов, так как тепло переносится с пресс-формы на спекаемый образец. Искровое плазменное спекание также имеет ограничения по объемам спекаемых образцов из оксида циркония, так как необходимы высокие скорости нагрева в процессе спекания. Низкий коэффициент теплопроводности оксида циркония приводит к возникновению высоких градиентов температур в спекаемом образце. При этом искровое плазменное спекание открывает новые возможности спекания электропроводных порошков благодаря прямому пропусканию тока через пресс-форму и порошковую засыпку, что создает Джоулев нагрев и более равномерное распределение температуры по всему объему спекаемого материала.

Для придания керамическим материалам свойств электропроводности в настоящее время широко используются углеродные наноструктуры, таких как углеродные нанотрубки (УНТ) и углеродные нановолокна (УНВ). При этом трудности получения равномерной дисперсии УНТ и УНВ в керамической матрице значительно ограничивают широкое применение данных материалов в промышленности. С момента открытия двумерной аллотропной модификации углерода – графена, усилия ученых сфокусированы на использовании данного материала в качестве упрочняющей фазы в керамической матрице. С данной точки зрения использование оксида графена имеет несколько ключевых преимуществ по сравнению с графеном: 1) оксид графена может быть получен используя менее затратные технологии; 2) как и все окисды, оксид графена может быть гомогенно распределен в водной суспензии, и, как следствие 3) смеси любой оксидной керамики и оксида графена могут быть получены используя традиционные методы перемешивания порошков оксидной керамики. Также благодаря геометрических параметрам графена добавление небольшого его количества в керамическую матрицу позволяет достичь порога перколяции во всем объеме образца, что позволяет получать электропроводные материалы.

В представленной работе получен высокоплотные электропроводный и свободный от пор оксид циркония черного цвета путем добавления небольшого количества оксида графена. Исследованы механические и электрические свойства, микроструктура и цвет полученно-

го керамического нанокомпозита. Полученный материал обладает свойствами электропроводности позволяющим спекать большие объемы оксида циркония при помощи искрового плазменного спекания, а также обрабатывать полученный материал при помощи методов электроэрозионной обработки, позволяющей изготавливать изделия сложной геометрической формы.

THE CALCULATOR TO DETERMINE THE POWER-ENERGY PARAMETERS OF METAL EXTRUSION

Shishin N.N.[1], Babailov N.A.[2]

[1] *Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Branch of Verkhnaya Salda, 1 Rabochey molodezhi st., Verkhnaya Salda, 624760, Russian Federation*

[2] *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya st., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation, e-mail:* babailov@imach.uran.ru

Objective: The aim of the research work is the development of interactive calculator or program for the determination of the power process parameters (e.g., force of deformation, relative pressure, strength calculations of pressing tools, etc.) in various processes of metal extrusion.

Results: The calculator is a software application for Windows XP, 7, 8 and 10. It was selected object-oriented programming language C Sharp (C#) in the development of custom software, which is analogous to C++.

The calculator named "Extrusion of metals and alloys" presents the calculation of the extrusion force according to the techniques of various metal forging researchers (for example, I.L. Perlin, S.I. Gubkin, A.A. Ilyushin, A.D. Tomlenov, L.A. Shofman, G. Sachs, W. Johnson, etc.) [1].

The interactive calculators [2] allow to use user-friendly program interface and fast to perform the required process computations. Also it performs to determine the workpiece deformation efforts in the various processes of metals extrusion (user selectable), for example, direct and reverse extrusion; extrusion solid and hollow profiles; the pressing profiles of complex cross section; extrusion through the combined dies; multi-line extrusion, etc.

It allows selecting the friction conditions on contact surfaces of the workpiece and pressing tools (for example, multi-layer container, needles, the die and prescribe). The friction conditions on contact surface are specified as friction factors according to the Siebel law.

The term of project is the creation the number of online-calculators to determine the power-energy parameters in the other processes of metal forging (e.g. wire drawing, rolling, forging etc.).

The necessary metal properties are selected from the program library or it depends on material properties such as the degree, rate and temperature of deformation (with known experimental coefficients).

The interactive calculators are designed for a wide range of specialists and will be useful to everyone, from students to engineers. It will be helpful to carrying out: analysis of the different pressing processes; technologically justified selection of the workpiece size and the process parameters (including temperature-rate conditions of workpiece deformation to perform strength calculation of the main elements of the deforming tool (e.g., multi-layer container, needles, dies, etc.).

The presented work is the student research. Calculators can be useful in the technical (or technological) divisions of metallurgical enterprises in Ural region, which are producing products from the non-ferrous metals and alloys.

References

1. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.

2. Шишин Н.Н., Бабайлов Н.А. Технологические калькуляторы для определения энергосиловых параметров прессования и волочения // XVI Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых-металловедов: Сборник научных трудов. Том 2. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С.211–213.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕОДНОРОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОУПРУГОГО СЛОЯ

Ватульян А.О., Нестеров С.А.

Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, 8-а, ул. Мильчакова, г. Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация, e-mail: 1079@list.ru

Многие элементы конструкций имеют слоистую структуру. Знание характеристик каждого слоя важно для адекватного математического моделирования термомеханических процессов. Рассмотрена обратная задача идентификации неоднородных характеристик слоя, состоящего из трех слоев с различными модулями. Неустановившиеся колебания термоупругого слоя возбуждаются двумя способами - механическим и тепловым. При решении прямой задачи на основе процедуры осреднения двумерную задачу удается свести к двум одномерным, которые решаются на основе аппарата интегральных уравнений Фредгольма 2-го рода в трансформантах по Лапласу. Для нахождения оригиналов температуры и перемещений применяется теория вычетов.

В обратной задаче требуется определить одну из термомеханических характеристик по дополнительной информации о смещении либо температуре на верхней грани слоя. Обратная задача решается на основе итерационного процесса, для построения которого получены операторные уравнения. Начальное приближение разыскивается на основе минимизации функционала невязки в классе кусочно-постоянных функций, а поправки реконструируемых функций находят путем решения интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода.

Проведен ряд вычислительных экспериментов по восстановлению термомеханических характеристик слоя, имеющих точки разрыва первого рода. Исследовалось влияние относительной толщины слоев, величины модулей на результат идентификации. Выяснено, что, чем больше толщина слоя и меньше величина модуля, тем реконструкция модулей в этом слое лучше. Наибольшая погрешность реконструкции возникала в окрестности точек разрыва.

Работа выполнена в рамках проекта Министерства образования и науки РФ № 9.665.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ЗУБА ЧЕЛОВЕКА ПОСЛЕ РЕСТАВРАЦИИ

Забродина А.А.[1], Спивак Н.М.[2], Григорьев С.С.[2], Зайцев Д.В.[1]

[1] *Уральский Федеральный Университет, Институт естественных наук, д. 19, Мира, Екатеринбург, 620000, Российская Федерация, e-mail: alexandramez@yandex.ru, dmitry.zaytsev@urfu.ru*

[2] *Уральский Государственный Медицинский Университет, д. 3. ул. Репина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация, e-mail: spivaknatalya@gmail.com, sergeygrig28@gmail.com*

Здоровые зубы способны эффективно функционировать в течении всего жизненного цикла человека. Однако, нередки случаи, когда их целостность нарушается под воздействием либо опасных механических нагрузок, либо при патологии. Современные методы в стоматологии позволяют восстановить целостность зуба. Время жизни реставрации определяется многими факторами, в частности механической совместимостью реставрационных материалов с дентином человека. Экспериментальное моделирование деформационного поведения дентина человека, соединенного с заместительным материалом в лаборатории, позволит оценить эффективность этих материалов и избежать клинических ошибок. Поэтому, целью данной работы является исследование деформационного поведения дентина человека адгезивно соединенного с реставрационными материалами при сжатии и корневого дентина содержащего волоконные штифты при сжатии и растяжении.

Для испытания на сжатие образцов дентина, адгезивно соединенных с реставрационным материалом, были изготовлены блоки из дентина. Их рабочие поверхности обрабатывали гелем ортофосфорной кислоты и выдерживали в течение 20 секунд для очистки дентинных каналов от продуктов полировки. После этого на них наносили адгезивную систему. Далее на образце моделировалась «шапка» из композиционного материала. Окончательно, полученные образцы механически обрабатывали для придания им правильной геометрической формы, толщина слоя дентина и реставрационного материала была одинакова. Для аттестации поведения зубов после эндодонтического лечения и последующего внедрения волоконных штифтов из корневых частей зубов были высверлены цилиндры при помощи полого алмазного сверла. В корневые отверстия которых закреплялись штифты. Далее эти цилиндры подвергались одноосному и диаметральному сжатию. Механические испытания проводились на разрывной машине Shimadzu AG-X 50 kN.

В результате проведенных исследований были разработаны методики аттестации зубов после реставрации, как коронковой части зуба, так и при эндодонтическом лечении. Показано, что высоконаполненные композиты на основе полимеров наиболее близки по свойствам к дентину, по сравнению с композитами с меньшим наполнением. Однако, были случаи, когда при разрушении высоконаполненного композита, следовало разрушение дентина, тогда как, при сжатии дентина соединенного с малонаполненным материалом дентин не разрушался. Представленные на рынке волоконные штифты отличаются значительно по своим свойствам. Полученные результаты позволят практикующему стоматологу сделать правильный выбор материалов при лечении.

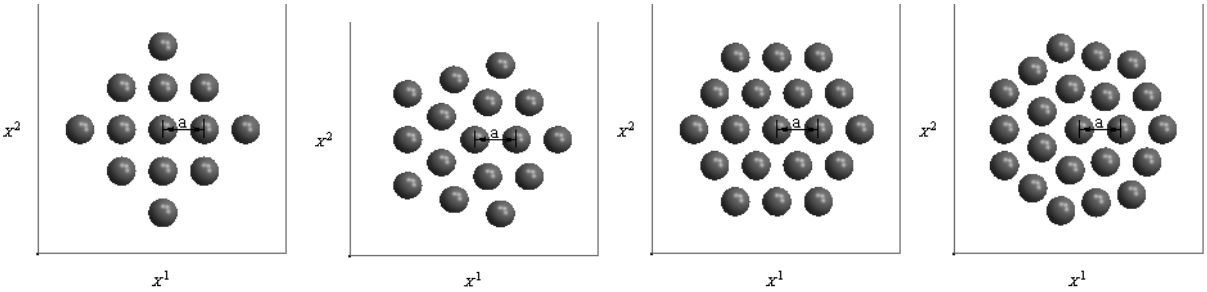
Работа выполнена при поддержке РФФИ №15-08-04073а

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ДВУМЕРНЫХ КВАЗИЕРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Стволова С.С., Зубко И.Ю.

ПНИПУ, каф. ММСП, д. 11, ул. Профессора Поздеева, г. Пермь, Российская Федерация,
e-mail: sofi1234@mail.ru, zoubko@list.ru

Для прогнозирования механических свойств наноструктурированных материалов требуются оценки физико-механических свойств наночастиц. Экспериментальные методы прямого их определения в настоящее время разработаны не полностью. Косвенные методы основаны на применении решений классических задач механики, что не всегда обосновано для нано- объектов. Альтернативой экспериментальным методам является применение дискретно-атомистического моделирования. Прогнозируемые свойства определяются выбранными потенциалами межатомного взаимодействия. Целью работы является сравнение возможностей двух- и многочастичных потенциалов, построенных на основе семейства Ми и потенциала Морзе при прогнозировании упругих свойств плоских квазикристаллических структур с осью симметрии заданного порядка (рис. 1). Для всех рассмотренных структур симметрия формы образца и микроструктуры совпадают для исключения наложения групп равноправности образца и материала. Деформации во всех случаях накладывались на образцы в равновесном начальном состоянии.



а) б) в) г)

Рис. 1. Элементы плоских квазикристаллических структур с осями симметрии
а) 4-го порядка, б) 5-го порядка, в) 6-го порядка, г) 7-го порядка

В работе получены точные выражения для тензора упругих свойств в виде сумм. Вид потенциалов при этом не конкретизируется, появляющиеся производные выражаются через силы межатомного взаимодействия, что позволяет исследовать возможности различных потенциалов для описания анизотропии и симметричности упругого отклика материала. Показано, что парные потенциалы позволяют описать лишь изотропию упругих свойств, тогда как реальные материалы являются анизотропными. Поэтому применение парных потенциалов не всегда дает адекватные результаты для тел с кристаллической микроструктурой. При использовании потенциала погруженного атома на основе потенциалов Ми и Морзе для различных двумерных структур получалось число независимых модулей, которое частично соответствует классическим результатам теории упругости. Отличие дает случай оси симметрии 6-го порядка, который должен описываться только двумя независимыми ненулевыми упругими модулями, а расчеты при этом давали три независимые компоненты тензора упругих свойств. Также для всех структур на рис. 1 получается заниженное значение модуля сдвига. Эти особенности требуют дополнительного исследования. В целом метод погруженного атома или иные многочастичные потенциалы позволяют более адекватно прогнозировать анизотропию упругих свойств материалов с кристаллической микроструктурой.

Работа выполнена в рамках задания № 2014/152 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части госзадания Минобрнауки РФ (код проекта — 1911).

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОВОЛОКОННЫХ ЛАМИНАТОВ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ МЕТОДОМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Обирин К.Д.[1], Пантелеев И.А.[2], Наймарк О.Б.[3]

Институт механики сплошных сред УрО РАН, д. 1, ул. Академика Королёва, г. Пермь, 614013, Российская Федерация, e-mail: [1]obirin.k@icmm.ru, [2]pia@icmm.ru, [3]naimark@icmm.ru

Рассматривается задача исследования механизмов разрушения стекловолоконных ламинатов с использованием кластерного анализа сигналов акустической эмиссии, полученных в результате квазистатического одноосного растяжения образцов. Кластерный анализ выполняется в прикладном математическом пакете MATLAB, приводятся результаты кластеризации сигналов и сопоставление их с механизмами разрушения.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, кластерный анализ, метод к-средних, стекловолоконные ламинаты.

Для проведения исследования были изготовлены образцы из четырехслойного стекловолоконного 2D-композита полотняного переплетения. Образцы изготавливались методом вакуумной пропитки VARTM (Vacuum Assisted RTM) с впрыском связующего при температуре 40 °C в течение 20 мин и последующей полимеризацией в течение 5–6 ч. Размер образцов (250x25x3,29 ± 0,15) мм, образцы вырезаны по направлению утка. На концах образцов были приклеены специальные накладки для захвата на испытательной машине размерами 40x15 мм, а также датчики акустической эмиссии. Испытание образца стекловолоконного композита на квазистатическое растяжение проводилось с постоянной скоростью деформирования на испытательной машине Instron 4505. Мониторинг проводился при помощи регистрационной аппаратуры Vallen AMSY-5 со встроенным программным обеспечением для анализа регистрируемых сигналов.

В результате испытания были получены параметры акустической эмиссии: частота максимума спектра, максимальная амплитуда и время нарастания импульсов. Именно эти параметры являются наиболее часто используемыми для кластеризации.

Для кластеризации данных акустической эмиссии использовался метод к-средних. Этот метод является наиболее предпочтительным для кластеризации сигналов акустической эмиссии.

При использовании индексов Дэвье–Болдина и Силуэта [1] было выяснено, что данные акустической эмиссии лучше всего разбиваются на четыре кластера.

Были получены гистограммы распределения параметров по четырем кластерам, а затем найдены их диапазоны (таблица).

Суммарные диапазоны параметров АЭ для четырех кластеров

Наименование кластера	Частота максимума спектра, кГц	Пиковая амплитуда, Дб	Время нарастания, мкс
CL1	49-292	36-99	195-1000
CL2	49-225	61-87	1300-2400
CL3	29-146	31-99	0-195
CL4	170-434	31-95	0-185

Для установления соответствия каждого кластера типичным механизмам разрушения ламинатов был проведен анализ работ, посвященный вопросам классификации источников АЭ [1–4]. В результате анализа были выявлены характерные диапазоны параметров импульсов АЭ, соответствующие механизмам разрушения стекловолоконных ламинатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сколковского института науки и технологий (проект MRA-319).

Литература

1. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites / L. Li, S.V. Lomov, X. Yan, V. Carvelli // Composite Structures. – Belgium: Elsevier, 2014. – P. 286–299.

2. Marec A., Thomas J-H., El Guerjouma R. Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2008. – P. 1441–1464.

3. Arumugam V., Kumar B., Santulli C., Stanley A.J. Effect of fiber orientation in unidirectional glass epoxy laminate using acoustic emission monitoring // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2011. – P. 351–364.

4. Pashmforoush F., Fotouhi M., Ahmadi M. Acoustic emission-based damage classification of glass/polyester composites using harmony search k-means algorithm // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2012. – P. 671–680.

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДИНАМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ НАГРУЖЕНИЯ

Ветошкин С.В.[1], Баяндин Ю.В.[2], Наймарк О.Б.[3]

ИМСС УрО РАН, д. 1, ул. Академика Королёва, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: [1]sega-w92@mail.ru, [2]buv@icmm.ru, [3]naimark@icmm.ru

Для создания композитных изделий часто требуется применение комбинаций из нескольких материалов, использование большого количества слоев, уложенных в различных направлениях, правильного подбора последовательности их укладки и т.д. Эти особенности делают процесс разработки конструкций из композиционных материалов значительно более трудоемким в сравнении с изделиями из традиционных материалов.

В работе описана методика выбора оптимальных характеристик материала изделия из композиционного материала путем исследования поведения конструкции под действием комплекса динамических нагрузок. В ходе проведения расчета на основе выходных данных была разработана модель оболочки вращения под действием динамической нагрузки с оптимальными свойствами композиционного материала.

Рассматриваемая конструкция представляет собой оболочку вращения. Со стороны днища модель жестко закреплена, со стороны сопла – свободна. С внутренней части приложено равномерно распределенное давление на внутренние стенки оболочки. Нагрузка изменяется во времени: максимальная величина давления достигает 60 МПа, время нагружения – 10 мс.

Материал конструкции представляет собой композит с ортотропными свойствами, представляющий собой набор слоев с перекрестной намоткой для базальтового волокна (±φ) и слоев кольцевой намотки из стекловолокна.

Основной задачей являлось постановка серии расчетов с одинаковыми граничными условиями и разными свойствами композиционного материала, зависящими от угла намотки φ, варьируемому от 10° до 80° с шагом в 5°. В каждой задаче фиксировались максимальные значения компонент напряжений в цилиндрической системе координат.

В результате обработки полученных данных был определен оптимальный угол намотки базальтового волокна, при котором компоненты напряжений были сравнимо ниже, чем при использовании других схем армирования.

СВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СО СТРУКТУРОЙ И ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ ЖАРОПРОЧНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Огнева М.С., Ригмант М.Б., Корх М.К., Корх Ю.В.

ИФМ УрО РАН, д. 18, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация,
e-mail: ogneva@imp.uran.ru

В материале наряду с фазой аустенита исходно содержится феррит, однако вследствие воздействия высоких температур и пластических деформаций в составе материала может появиться третья фаза – мартенсит деформации. Электропроводность каждой из фаз различна. Одной из основных приемосдаточных характеристик при оценке качества аустенитно-ферритных хромоникелевых сталей является удельное электросопротивление (ρ, Ом·м). Стоит отметить, что появление мартенситной фазы, при статическом или динамическом деформировании влияет на электрические свойства изделий, а также напрямую влияет на степень охрупчивания сталей, особенно в зонах концентрации напряжений.

С помощью сканирующего зондового микроскопа Солвер Некст получены электросиловые изображения поверхности образцов, подвергнутых пластическому деформированию с предварительным охлаждением до температуры жидкого азота (данная обработка способствует образованию устойчивой мартенсит деформационной фазы). Видно, что феррит обладает большим электропотенциалом по сравнению с аустенитом. Однако, в процессе деформирования материала внутри области аустенита появляются зоны с более высокой электрической проводимостью, чем у самого аустенита, что связано с появлением фазы мартенсита деформации. Далее проведены измерения электрических свойств образцов с фиксированным значением фазы феррита после деформационного воздействия. Установлена зависимость между процентным содержанием магнитожесткой мартенситной фазой и величиной удельного электрического сопротивления для сталей хромоникелевого класса, с различным изначальным содержанием ферритной фазы. Увеличение содержания фазы мартенсита практически линейно связано с ростом ρ. Стоит отметить, что увеличение удельного сопротивления, с точки зрения технической применимости изделия, является благоприятным фактором, однако, было выявлено, что рост связан с возникновением в материале мартенситной фазы, которая может привести к охрупчиванию и разрушению.

С целью контроля удельного электрического сопротивления на базе института разработан прибор «Микроомметр специализированный», позволяющий производить измерения в широком диапазоне значений электросопротивлений от 1 мкОм до 2мОм. Особенность данной разработки заключается в возможности измерять образцы с различным поперечным сечением (от 2 до 14 мм). Прибор, обладающий высокой чувствительностью способен с достаточной точностью определять ρ аустенитных хромоникелевых сталей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-12-00001).

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1 С КВАДРАТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОР С ПОРОЙ В ЦЕНТРЕ

Воронин С.В., Лобода П.С., Ледяев М.Е.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)", д. 34, Московское шоссе, г. Самара, 443086, Российская Федерация, e-mail: voronin@ssau.ru, sillmarllion@mail.ru, stimulator90@mail.ru

Для создания техники, используемой в авиации и космонавтике, требуются материалы, которые наряду с высокими механическими свойствами обладают малым весом. Для их изготовления в объем основного материала добавляют легирующие элементы, которые образуют упрочняющие фазы. Однако наличие таких фаз, как правило, приводит к увеличению массы. Для снижения веса в объем основного материала мы предлагаем вводить поры, которые обладают «нулевой» плотностью. По нашему мнению, определенное расположение пор позволит улучшить свойства материала по сравнению с компактным.

Целью данной работы является определение влияния упорядоченной квадратной структуры пор с порой в центре на предел текучести материала. Таким образом, поры располагаются в вершинах воображаемых сопряженных квадратов, а также в точке пересечения диагоналей их вершин.

Конечно-элементная модель образца материала с пористой структурой строилась путем копирования элементарной ячейки, линейные размеры которой зависели от выбранной пористости образца, с порой диаметром 10 мкм. По торцам пористых образцов были построены буферные зоны из компактного материала для создания равномерного приложения граничных условий к конечно-элементной модели. Для сокращения времени построения моделей образцов была написана программа-приложение на языке программирования Python. Конечным элементам задавались механические свойства алюминиевого сплава АД1М. Исследование проводилось в программе инженерного анализа и моделирования MSC Marc, основанной на методе конечных элементов.

Ряд полученных конечно-элементных моделей образцов с разной пористостью подвергался одноосному растяжению с усилием, вызывающими напряжение 50 МПа, что превышает предел текучести для данного сплава, но не превышает его предел прочности. Затем были построены диаграммы растяжения, которые позволяли оценить предел текучести моделей пористых образцов и сравнить его с пределом текучести образцов из компактного материала аналогичного размера.

При анализе полученных диаграмм растяжения установлено, что при увеличении пористости материала до 20 % и более происходит снижение предела текучести и увеличение пластических свойств образца, что вполне закономерно. Однако, при незначительной пористости образца (порядка 0,4-0,5 %) предел текучести материала приближается к пределу текучести компактного материала. По мере дальнейшего уменьшения пористости наблюдается увеличение предела текучести материала, и при пористости 0,1% предел текучести оказался выше на 2,925 % по сравнению с компактным материалом.

СТЕПЕНЬ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Подкина Н.С., Кузнецова Е.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, Пермский край, 614990, Российская Федерация,
e-mail: podkina_ns@mail.ru, mellen75@mail.ru

Технологические процессы обработки металлов давлением, как правило, сопровождаются неравномерной пластической деформацией по сечению. Например, при волочении периферийные слои подвергаются повышенным деформациям сдвига в продольном направлении по сравнению с центральными. Поэтому после окончания процесса структура заготовки претерпевает значительные изменения, которые неоднородны по сечению и объему, вследствие чего в готовой детали формируются остаточное напряженное состояние. В работе предлагается методика определения степени пластической деформации, где степень деформации, следуя Ильюшину А.А. определяется как сумма интенсивностей последовательных малых деформаций сдвига $Hd\tau$, которые претерпела частица с момента возникновения τ_0 в ней пластического течения до данного момента τ_1:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_{\tau_0}^{\tau_1} Hd\tau, \quad (1)$$

Здесь H – интенсивность скоростей деформации сдвига определяется следующим образом:

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2 + \frac{3}{2}\left(\eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{xz}^2\right)}, \quad (2)$$

где $\xi_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)$, v_i – компоненты вектора скорости.

После определения интенсивности скоростей деформации и подстановки в соотношение (2), а затем подстановки интеграл (1) подсчитывается вдоль линии тока в предположении, что направление малых приращений пластической деформации совпадает с направлением скоростей деформации.

Выражение степени деформации после преобразований для процесса волочения трубной заготовки определяется в виде:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} tg\alpha \frac{\bar{r}}{(R_{1вх} - R_{2вх})} + \sqrt{4 + 3\frac{\bar{r}^2}{(R_{1вх} - R_{2вх})^2} tg^2\alpha} \ln\left[\frac{R_{1вх} - R_{2вх}}{R_1 - R_2}\right]. \quad (3)$$

Здесь α – угол конусности матрицы волоки, $R_{1вх}$, $R_{2вх}$ – внешний и внутренний радиусы заготовки на входе в инструмент, R_1, R_2 – внешний и внутренний радиусы на выходе соответственно. С использованием вышеизложенной методики создан программный продукт, который позволяет определять величину степени пластической деформации при волочении осесимметричных металлоизделий для различных техологических параметров и геометрии детали.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ДАННЫХ В ПРОЦЕДУРАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

Частоедов В.А., Кондратьев Н.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614000, Российская Федерация, e-mail: v.a.chastoedov@mail.ru, kondratevns@gmail.com

В настоящее время существует класс физических моделей неупругого деформирования представительного объема поликристаллов, явно учитывающих внутреннюю структуру материала [1]. Неотъемлемой частью для создания таких моделей является процедура идентификации и верификации, где определяется адекватность разработанной модели при различных условиях нагружения. Самым распространенным методом идентификации и верификации моделей является сопоставление кривых деформирования «σ-ε». Подобный подход вызывает множество вопросов, поскольку сравнение поведения материала происходит лишь на макроуровне. Следует отметить, что в ходе численных экспериментов физических моделей определяется эволюция ориентаций кристаллитов, которую можно представить в виде полюсных фигур, но для процедур идентификации и верификации параметров модели эти данные, как правило, не используются. В настоящей работе предлагается применять полюсные фигуры, отражающие мезоструктуру материала, в процедуре идентификации для многоуровневых физических моделей. Предложив критерий близости экспериментальных и модельных полюсных фигур, в дальнейшем можно ставить и решать оптимизационные задачи нахождения параметров модели.

Целью данной работы является построение, постановка и решение оптимизационных задач идентификации и верификации параметров физической многоуровневой модели неупругого деформирования, которые относятся к мезомасштабам, с использованием экспериментальных данных распределения ориентаций зерен поликристалла. Для решения поставленной задачи предлагается исследовать корреляцию спектрального состава исходных данных. В работе исходными данными являются массивы ориентации зерен, полученные путем преобразования полюсных фигур. Массивы данных представляет собой двумерный массив, где номер элемента массива указывает на координаты в пространстве (на полюсной фигуре), а значение – вероятностная характеристика попадания направления кристаллита на выделенную площадку. Основная часть работы посвящена сравнению полученных массивов данных. Для определения частотной составляющей массивов используется вейвлет-преобразование[2, 3]. Суть вейвлет-преобразования состоит в разложении исходного сигнала, в данном случаи массивов данных, по солитоноподобным базисным функциям путем изменения их масштаба и переноса. Данный аппарат способен анализировать локальные и нестационарные сигналы, в этом и заключается его главное преимущество. В результате такого имеется частотно-временные характеристики сигнала, по которым строится корреляционная функция. Завершающим этапов работы является введение корреляционной меры.

В ходе исследования был разработан алгоритм задачи сравнения двух прямых полюсных фигур. Проведены серии численных расчетов для модельных случаев самостоятельно заданных полюсных фигур. При генерировании ориентаций зерен использовались равномерный и нормальный законы распределений углов Эйлера. Показано, что результаты данной работы, а точнее полученный способ для сопоставления полюсных фигур, можно применять в физических моделях неупругого деформирования, с целью идентификации параметров модели ротации, описывающей текстуробразование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№15-08-06866-а, №16-31-60002-мол-а-дк, № 16-31-00215-мол-а).

Литература

1. Трусов П.В. Физические теории пластичности: учеб. пособие /П.В. Трусов, П.С. Волегов, Н.С. Кондратьев. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 244 с.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ

Кузнецова Е.В., Колмогоров Г.Л.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский пр., Пермский край, г. Пермь, 614990, Российская Федерация, e-mail: mellen75@mail.ru, dpm@pstu.ru

Уровень остаточных напряжений является во многих случаях важным параметром, определяющим качество металлоизделий, полученных в результате пластического деформирования методами обработки давлением. Разработка методов определения остаточных напряжений в металлоизделиях, которые могут достигать значительных величин вплоть до предела текучести и прочности материала, что зачастую приводит к разрушению конструкций еще при хранении или в первые часы эксплуатации при достаточно низком уровне эксплуатационных нагрузок.

В работе предложена инженерная методика определения технологических остаточных напряжений при пластическом деформировании труб на основе энергетического подхода. Сущность энергетического подхода заключается в том, что потенциальная энергия остаточных напряжений U рассматривается как часть энергии U_d, пошедшей на пластическое деформирование [3]:

$$U = \psi U_d \text{, (1)}$$

где ψ – параметр, определяющий долю энергии пластического деформирования, пошедшую на формирование остаточных напряжении.

Величина энергии пластического деформирования определяется соотношением

$$U_d = S_{\text{сеч}} \int_0^{\varepsilon} \sigma_s \, d\varepsilon \text{, (2)}$$

где $S_{\text{сеч}}$ – площадь сечения металлоизделия; σ_s – сопротивление деформации обрабатываемого материала; ε – степень пластической деформации для конкретного технологического перехода.

Потенциальная энергия упругих остаточных напряжений будет равна

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \, dV \text{, (3)}$$

где σ_{ij} – компоненты тензора остаточных напряжений ε_{ij} – компоненты тензора упругих деформаций от действия остаточных напряжений; V – объем изделия.

Технологические остаточные напряжения носят упругий характер, поэтому они определяются из решения упругих задач для конкретной конфигурации металлоизделий, в частности, осесимметричных тел (проволока, пруток, труба). Таким образом, разработана методика определения технологических остаточных напряжений в осесимметричных металлоизделиях, формируемых при пластическом деформировании. Решения получены в аналитическом виде. В выражения для определения остаточных напряжений входят основные параметры процесса обработки, механические свойства материала и геометрические характеристики изделия.

Приведенная методика дает возможность определять величину остаточных напряжений в зависимости от условий пластического деформирования для проволоки, прутков и труб из различных металлов и сплавов. Знание величины остаточных напряжений позволяет прогнозировать поведение металлоизделий в условиях эксплуатационных нагрузок и предотвращать их разрушение.

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ СТАЛИ У8А ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ГИДРОЭКСТРУЗИИ

Горкунов Э.С.[1], Задворкин С.М.[1], Горулева Л.С.[1], Макаров А.В.[1,2], Печеркина Н.Л.[2], Черемицина Э.Р.[1]

[1] *Институт Машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: sherlarisa@yandex.ru*

[2] *Институт физики металлов УрО РАН, д. 18, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

Методы интенсивной пластической деформации позволяют получить улучшенный комплекс физико-механических свойств материала без изменения его химического состава, в первую очередь за счет диспергирования структуры. Гидроэкструзия, или гидропрессование, как один из видов объемной ИПД, дает возможность обрабатывать изделия из малопластичных материалов, к которым и относятся высокоуглеродистые стали. В настоящей работе исследовали структуру высокоуглеродистой стали У8А, подвергнутой интенсивной пластической деформации методом гидроэкструзии при комнатной температуре. Степень деформации варьировалась от 0 до 2,19. Исходная структура стали – зернистый перлит. Для исследования применяли методы рентгеноструктурного анализа, дифракции обратно рассеянных электронов и просвечивающей электронной микроскопии. Согласно рентгеноструктурным исследованиям в стали при гидропрессовании формируется аксиальная однокомпонентная текстура типа <110>. При увеличении степени деформации выше 1,62 наблюдается неравноосность, вытянутость зерен в направлении прессования. Показано, что с увеличением степени деформации происходит измельчение структурных элементов, так что при степени деформации 2,19 средний размер зерна уменьшается примерно в 100 раз с 20 мкм в исходном состоянии. Установлена однозначная зависимость плотности большеугловых границ от степени деформации на всем интервале изменения деформации. При больших степенях деформации одновременно с увеличением плотности границ увеличивается размер областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения и уменьшается плотность дислокаций в теле зерна, что может свидетельствовать о протекании в материале процессов динамического возврата и рекристаллизации.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием (№ ГР 01201354598) и при поддержке РФФИ (проект № 16-38-00586).

ВЛИЯНИЕ ТРЕУГОЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛАНА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1

Воронин С.В., Лобода П.С., Ледяев М.Е.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)", д. 34, Московское шоссе, г. Самара, 443086, Российская Федерация, e-mail: voronin@ssau.ru, sillmarllion@mail.ru, stimulator90@mail.ru

Создание материалов с высокой весовой эффективностью является актуальной задачей. Такие материалы обладают малым весом в сочетании с высокими механическими характеристиками. Для повышения уровня механических свойств материала в него, как правило, вводят легирующие элементы, что неизбежно ведет к увеличению веса. В качестве средства для уменьшения плотности материала при сохранении уровня механических свойств мы предлагаем использовать замкнутые сферические поры. По нашему мнению, при определенном расположении пор возможно повысить прочность основного материала.

Целью работы является оценка влияния треугольной пористой структуры на предел текучести материала. При таком типе структуры, поры расположены в вершинах воображаемых сопряженных правильных треугольников. Таким образом, межцентровые расстояния ближайших пор во всех направлениях одинаковы.

Механические свойства определялись по методике, разработанной нами в программной среде MSC Marc, основанной на методе конечных элементов. Для построения моделей образцов необходимой геометрии и пористой структуры была написана программа-приложение на языке программирования Python. Конечно-элементная модель образца строилась по принципу заполнения необходимого пространства копированием элементарной ячейки с порой диаметром 10 мкм. Линейные размеры ячейки различались в зависимости от выбранной пористости. Для создания корректных условий приложения усилий к конечно-элементной модели образца по торцам были построены буферные зоны из компактного материала. Конечным элементам задавались механические свойства сплава АД1М в отожженном состоянии.

Полученный ряд конечно-элементных моделей образцов с различной пористостью подвергался одноосному растяжению с усилиями, вызывающими напряжение 50 МПа, что выше предела текучести для данного сплава, но ниже его предела прочности. Далее расчетным способом строились диаграммы растяжения, по которым проводилась оценка предела текучести пористых образцов и его сравнение с пределом текучести компактного материала.

При анализе полученных диаграмм растяжения было установлено, что увеличение пористости материала до 15 % и более приводит к уменьшению предела текучести и улучшению пластических свойств образца. При незначительной пористости образца предел текучести пористого материала приближается к пределу текучести компактного материала, и даже превосходит его. Так при пористости 0,1 % выявлено увеличение предела текучести на 1,029 % по сравнению с компактным материалом.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Li МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Смирнова Е.О., Смирнов С.В., Пугачева Н.Б.

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

Лазерная сварка металлов получила значительное развитие ряду преимуществ: локальность воздействия, высокая производительность, точность, экономичность, возможность автоматизации процесса. Все это обуславливает актуальность работ, связанных с изучением свойств сварных соединений. В работе проведено исследование свойств зон сварного соединения Al-Mg-Li сплава, полученного путем сварки CO_2-лазером. В качестве материала для исследования был выбран сплав алюминия 01420Т, поскольку обладает уникальным сочетанием таких свойств как коррозионная стойкость, теплопроводность, низкой плотности при высоких значениях удельной прочности. Сверхлегкие алюминиевые системы Al–Mg–Li, такие как сплава 01420, благодаря сочетанию выше указанных свойств и хорошей свариваемости, применяются в авиационной технике, например, в качестве материала для обшивки фюзеляжа самолетов. Целью настоящей работы является определение свойств зон сварного соединения сплава 01420Т методом кинетического индентирования. Актуальность работы объясняется тем, что свойства сварного соединения обусловлены свойствами металла самого шва и зоны основного металла, прилегающего к шву, с измененной структурой и во многих случаях с измененными свойствами зоны термического влияния. Листы из сплава 01420Т толщиной 1,5 мм были сварены в ИТПМ СО РАН с помощью CO_2 –лазера при мощности излучения 3,5 кВт в условиях защитной обдувки гелием. В сварном соединении были исследованы три зоны: сварной шов, содержащие мелкие столбчатые дендриты, зону термического влияния и основной металл. Кинетическое индентирование выполняли на испытательном комплексе для наномеханических испытаний Nanotriboindentor TI950 при максимальной нагрузке на индентор 10 мН. По результатам измерений были построены графики распределения твердости и приведенный модуль по ширине сварного шва и карта распределения твердости всех зон шва. В работе для оценки свойств зон сварного соединения системы Al-Mg-Li так же был применен метод царапания. Царапание проводили индентором Берковича по схеме «ребром вперед». С применением методики определения диаграммы деформационного упрочнения по результатам проведения испытаний на вдавливание и царапание определены прочностные свойства поверхностных слоев различных зон сварного соединения из листов алюминий-литиевого сплава 01420Т. При лазерной обработке скорости нагрева и охлаждения очень высоки (порядка 600 – 1000 °С/сек), поэтому в зонах термического влияния изменения, связанные с нагревом, крайне небольшие, что проявилось и в незначительном снижении значений микротвердости. Твёрдость исходного сплава 01420 выше, чем в зоне термического влияния и в сварном шве, причём минимальные значения твёрдости наблюдаются в центральной части сварного шва. Таким образом, полученные сварные соединения характеризуются некоторой структурной неоднородностью, которая определяет неравномерное распределение свойств по ширине швов. В отличие от твердости, модуль упругости не является структурно-чувствительной характеристикой, а определяется, в основном, параметрами кристаллической решетки и поэтому не меняет своего среднего значения в зоне термического влияния. Снижение модуля упругости металла в зоне сварного шва обусловлено меньшей его плотностью из-за наличия микропор, расположенных в междендритных пространствах. Поэтому для исследованного сварного шва правильней говорить об определении эффективных значений модуля упругости.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВДАВЛИВАНИЯ ИНДЕНТОРА В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Кузнецов А.В., Саврай Р.А.

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

Одной из основных проблем механики деформированного твердого тела является построение методов, позволяющих эффективно, быстро и точно оценивать напряженное состояние различных элементов конструкций. Поскольку в технике широко применяются объемные элементы, то для их описания используются различные теории твердого тела.

Появившиеся в последнее время вычислительные комплексы, основанные на методе конечных элементов, например, ANSYS [1], Cosmos [2] и др. позволяют решать широкий круг прикладных задач для объемных тел. Таким образом, задача определения напряженного состояния объемного тела от механической нагрузки может быть достаточно просто решена, используя данные вычислительные комплексы. С другой стороны, классическое теоретическое решение краевой задачи говорит нам о том, что значение напряжения по границе зоны взаимодействия будет стремится к бесконечности [3, 4].

Картина полученных полей напряжений в целом совпадает, хотя значения полученные значения оказываются выше, что напрямую связанно с измененными свойствами материала. Значения напряжений во внутренней области также близко к около нулевой зоне, в то время как на краях происходит близкий к асимптотическому рост значений напряжений, что характерно для классического решения данной задачи.

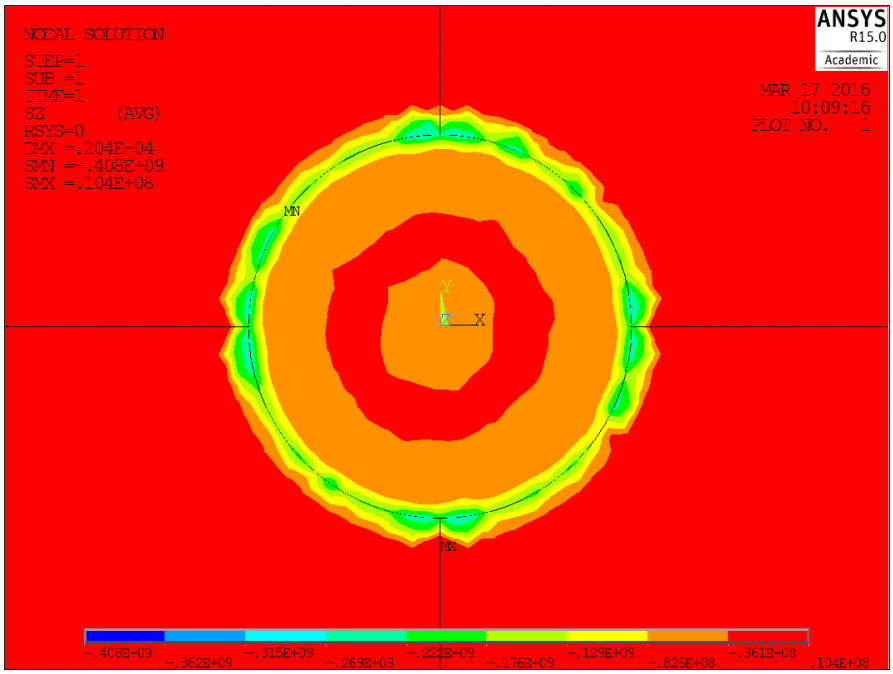


Рис. 1. Напряженное состояние образца расчетном случае (напряжения вдоль оси приложенного перемещения)

Литература

1. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
2. Алямовский А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. - М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов. Анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 624с.
4. Филин А.П. Прикладная механика деформируемого тела. Т.1. М.: Наука, 1975. – 832 с.

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ

Демидов С.А., Левина А.В., Вахонина К.Д., Шестопалов Ю.А., Шарапова В.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, д. 19, ул. Мира, 620002, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: mla44@mail.ru

Холодная пластическая деформация является надежным и простым способом достижения высокопрочного состояния при производстве определенной номенклатуры металлоизделий, таких как проволока, лист, трубы и т.п. В данной работе приводятся результаты структурных исследований сталей на Fe-Cr-Ni основе, содержащих деформационно-метастабильный аустенит, который при пластической деформации частично или полностью переходит в мартенсит деформации. Так как количество аустенита в исследуемых сталях различно (≈ 10 % в аустенитных сталях с пониженным содержанием кобальта, ≈ 50 % аустенитно-ферритных, ≈ 100 % в аустенитных с 5,0 % Co), то и влияние образовавшегося мартенсита деформации и связанного с ним трип-эффекта неодинаково. Наиболее сильно выраженный трип-эффект имеет место в стали аустенитного класса 03Х14Н11К5М2ЮТ, что является одним из факторов, определяющим ее высокую пластичность. Это обстоятельство позволяет проводить холодную пластическую деформацию с чрезвычайно высокими степенями обжатия, существенно сокращать число промежуточных смягчающих термических обработок при производстве проволоки тонких сечений и получать в структуре стали нанокристаллическое состояние. Эту сталь можно использовать для высокопрочных миниатюрных изделий в связи с её высокой технологичностью при деформации, а также при получении упругих элементов и пружин большого и среднего сечения путём сочетания различных механизмов деформации (РКУП с последующим волочением). Структурные исследования сталей на Fe-Cr-Ni основе с различной стабильностью аустенита выполнены в комплексе с изучением механических свойств и фазового состава. Кривые деформационного упрочнения, построенные в координатах $2\ln d_o/d_x \div \sigma_в$, практически прямолинейны. Это позволило ввести коэффициент деформационного упрочнения k. Для сталей, имеющих в результате закалки аустенитную структуру и претерпевающую мартенситное превращение в процессе холодной пластической деформации – коэффициент дефрмационного упрочнения ≈ 400 МПа. Низкий коэффициент деформационного упрочнения мартенситностареющих сталей обусловлен высокой плотностью легкоподвижных дислокаций в исходном закаленном состоянии, а также малым содержанием примесей внедрения. Аустенитно-ферритная сталь вследствие гетерофазности структуры имеет выше коэффициент деформационного упрочнения, чем у аустенитной стали, с таким же содержанием углерода, который составляет ≈ 540 МПа. Таким образом, фазовый состав стали оказывает значительное влияние на изменение свойств в ходе деформационного упрочнения. Фазовый состав изучаемых сталей зависит от легирования. Так кобальт, понижающий энергию дефектов упаковки сталей, подавляет образование мартенсита деформации при волочении. В сталях аустенитного класса с пониженным содержанием кобальта коэффициент деформационного упрочнения выше, вследствие большего количества образовавшего мартенсита деформации.

Рассматриваются возможные механизмы упрочнения и пластической деформации и их взаимовлияние на формирование механических свойств, особенно на пластичность и технологичность. Обсуждаются механизмы структурных превращений, ответственных за высокую пластичность стали с метастабильным аустенитом.

РЕЛАКСАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПРУЖИННОЙ ЛЕНТЫ ИЗ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Вахонина К.Д., Ягудин Г.А., Левина А.В., Озерец Н.Н.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, д. 19, ул. Мира, 620002, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: mla44@mail.ru

Разработанные на кафедре стали аустенитного 03Х14Н11К5М2ЮТ и аустенитно-ферритного 03Х14Н10К5М2Ю2Т классов для упругих элементов и пружин ответственного назначения показали высокие прочностные и технологические свойства. Для пружинной ленты кроме прочностных, упругих и пластических свойств важной характеристикой является и её релаксационная стойкость при повышенных температурах. Кроме того в связи с широким интервалом рабочих температур пружин ответственного назначения и упругих элементов приборов представляло интерес изучить механические свойства исследуемых сталей при пониженных температурах вплоть до криогенных. Высокая релаксационная стойкость обеспечивает постоянство во времени силовых параметров пружин и является необходимым условием их надежной работы. Поэтому необходимо знать сопротивление релаксации напряжений в пружинной ленте.

Для высокопрочных материалов, к которым относятся и пружинные сплавы, следует иметь в виду, что достижение высокой прочности практически всегда основано на получении метастабильного состояния. Для метастабильного состояния релаксация обусловлена взаимодействием структурного и сдвигового механизмов. Испытания на релаксацию напряжений проводилось на ленточных образцах сечением 0,5х4,5 из аустенитной 03Х14Н11К5М2ЮТ и аустенитно-ферритной 03Х14Н10К5М2Ю2Т сталей. Начальное напряжение задавалось равным 0,7-0,8 от значения предела упругости $\sigma_{0,03}$. Температура закалки образцов составляла 1000°С в воду. Затем образцы были продеформированы волочением со степенью 55 % с последующем плющением проволоки в ленту с деформацией 60 %. Из полученных данных следует, что на релаксационную стойкость деформированной стали большое влияние оказывает структурный механизм – степень структурной метастабильности, т.е. значительная релаксация напряжений в деформированных образцах связана с интенсивным протеканием процессов, стабилизирующих структуру стали непосредственно в поле приложения напряжений изгиба. Наиболее низкая релаксационная стойкость наблюдается после закалки и пластической деформации, и составляет 65 %. Ранее было показано, что наиболее высокое сопротивление малым пластическим деформациям достигается при температуре старения 450-500°С. Поэтому за оптимальную обработку исследованных сталей была выбрана обработка: закалка+ деформация+ старения 500°С 1 ч после которой происходит увеличение сопротивления малым пластическим деформациям и, как следствие этого, увеличение степени стабильности структуры. Дополнительное старение увеличивает сопротивление релаксации напряжений при 400 °С, особенно в том случае, когда температура старения становится выше температуры релаксации, т.е. когда происходит образование более стабильной структуры. При этом релаксационная стойкость после старения на 500°С исследуемых сталей составляет 12 % и 17 % соответственно.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ТАКТИЧЕСКИХ ОПЕРАТИВНО-СОВЕТУЮЩИХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Бурсук В.И.[1], Васильев С.Н.[2], Галяев А.А.[2], Горкунов Э.С.[3], Гурьев Ю.В.[4], Задворкин С.М.[3], Морозов Н.Ю.[2], Якушенко Е.И.[4]

[1] *Главное командование ВМФ, д.1, Адмиралтейский пр., Санкт-Петербург, 190195, Российская Федерация*
[2] *Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, д. 65, ул. Профсоюзная, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: snv@ipu.ru*
[3] *Институт машиноведения УрО РАН,д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: zadvorkin@imach.uran.ru*
[4] *Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», д.1, Кадетский б-р, 1, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация, e-mail: uvgur@mail.ru*

Современные сложные технические объекты – самолеты, в том числе боевые, транспортные средства, масштабные стационарные объекты, например, мегаполисы и др. – требуют для эффективного управления и обеспечения безопасности использования оперативно-советующих систем поддержки принятия решений. Одним из перспективных направлений внедрения таких систем является обеспечение скрытности подводных объектов (ПО) по физическим полям (ФП) и, как следствие, их защита от поражения морским оружием.

Практическим шагом в создании таких систем должен стать бортовой комплекс управления скрытностью (БКУС) ПО по ФП. Работа по его созданию ведется уже несколько лет. Функционирование комплекса основано на сборе и обработке всей информации, имеющейся на борту объекта и влияющей на его скрытность. Эта информация включает сведения о тактической и физической обстановке вне объекта, а также данные о параметрах работы его машин и механизмов, поступающей от соответствующих комплексов и систем ПО.

Получив эту информацию и используя специально разработанное математическое и программное обеспечение, комплекс в автоматическом режиме осуществляет прогноз уровня актуальных для данной обстановки ФП, а затем выполняет расчет вероятности необнаружения по каждому полю различными средствами обнаружения и дает оценку комплексной вероятности необнаружения.

Анализ этого поля вероятностей позволяет построить такую траекторию движения и задать такие режимы работы машин и механизмов объекта, при которых комплексная вероятность ее необнаружения будет максимальной.

Одной из наиболее сложных научных задач создания комплекса, является прогнозирование параметров ФП. Анализ современных сил и средств, используемых для обнаружения ПО показывает, что демаскирующими признаками обладают, в первую очередь, гидроакустические поля – первичное и вторичное (ПГАП и ВГАП), магнитное (МП) и гидрофизическое (ГФП) поле. В разработанный электронный прототип комплекса были включены три поля: ПГАП, МП и ГФП.

В дальнейшем предполагается не только увеличить число физических полей, но и совершенствовать математическое и программное обеспечение для их моделирования. Основной тенденцией такого совершенствования является переход от полуэмпирических моделей ФП к более строгим и точным моделям, основанным на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии.

Проведенные исследования позволили обосновать целесообразность создания БКУС и технологическую возможность его разработки и внедрения. В ходе этих исследований были определены схемные, программно-аппаратные и алгоритмические решения и модульный принцип организации БКУС, обоснована номенклатура значимых для обнаружения ФП, сформулированы требования по открытости архитектуры комплекса, его восприимчивости к расширению числа каналов ФП и ряд других принципов и условий.

Перспективными направлениями использования БКУС может быть применение его аналогов в качестве штабной (береговой) оперативно-советующей системы информационной поддержки планирования боевых операций и тренажера для обучения курсантов и слушателей, а также подготовки специалистов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Зезин Ю.П.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, Москва, ГСП-1. Ленинские горы, 1. МГУ, Институт механики, Российская Федерация e-mail: yuzezin@gmail.com

Зернистые полимерные композиты представляют широкий класс конструкционных материалов, основой которых являются различные каучуки и порошкообразные наполнители, придающие композитам необходимый комплекс физико-механических и эксплуатационных характеристик. Вязкоупругие свойства подобных материалов обусловлены не только механизмами перестройки физической структуры полимерного связующего, но также и нарушением адгезионных связей между частицами наполнителя и полимером. В результате предельные характеристики подобных материалов существенно зависят от скорости нагружения или деформирования. Основным видом механических испытаний, по результатам которых определяются предельные характеристики полимерных материалов, является растяжение при фиксированной скорости деформации. Тем не менее, в большинстве случаев элементы конструкций испытывают сложное напряженное состояние в процессе эксплуатации. В этой связи исследование особенностей механического поведения конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния представляется вполне целесообразным. Подобные испытания необходимы для установления критериев разрушения материалов, учитывающих влияние вида напряженного состояния на сопротивление материалов механическим нагрузкам.

Целью данной работы является экспериментальное исследование предельных характеристик двух модификаций зернистых композитов на основе синтетического каучука при различных видах напряженного состояния. Испытания материалов проведены с использованием специальной электромеханической установки для исследования механических свойств полимерных материалов при сложном напряженном состоянии. Установка обеспечивает пропорциональное нагружение образцов полимерных материалов в широком диапазоне скоростей деформаций. Все испытания материалов проведены при температуре 20°C. Представлены результаты механических испытаний исследуемых материалов в условиях растяжения, сжатия и плоского напряженного состояния, которое задавалось при нагружении образцов в виде тонкостенных цилиндров растягивающей силой и крутящим моментом. Испытания проведены в широком диапазоне интенсивности скоростей деформаций, охватывающем пять десятичных порядков. Показано, что предельные характеристики исследуемых материалов существенно зависят от скорости деформирования. При фиксированной интенсивности скоростей деформаций для прогнозирования условий разрушения пригодна модифицированная энергетическая теория прочности. Для оценки времени до разрушения композитов при нагружениях, предполагающих существенное изменение скорости деформации, возможно использование энергетического критерия длительной прочности полимерных материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-03604.

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ/РАЗРУШЕНИЯ И ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИОНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Панин С.В.[1,2], Любутин П.С. [1,2], Титков В.В. [1], Чемезов В.О. [1], Бяков А.В.[1], Бурков М.В.[1,2], Еремин А.В.[1,2], Поляков И.Ю. [1]

[1]*ИФПМ СО РАН, Томск, Российская Федерация*

[2]*Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация*

В настоящее время в рамках оптического метода оценки деформации широкое распространение получил способ корреляции цифровых изображений (DIC - Digital Image Correlation), позволяющий исследовать процессы деформации и разрушения структурно-неоднородных материалов (металлов, сплавов, керамики, полимеров и т. п.), а также диагностировать механическое состояние нагруженных деталей машин и элементов конструкций. Применение данного метода позволяет обеспечить высокую разрешающую способность и чувствительность, снять ряд ограничений по классу анализируемых объектов и материалов, снизить затраты на изготовление и эксплуатацию технических средств измерения. Оценка деформации методом корреляции цифровых изображений основана на построении векторов перемещений (оптического потока) и последующем их численном дифференцировании. Основоположниками направления оценки деформации методом корреляции цифровых изображений являются M. A. Sutton, S. R. McNeill, W. H. Peters, W. F. Ranson и др. В работах данной группы метод DIC применен для анализа процессов распространения усталостных трещин, что реализовано путем пересчета полей векторов перемещений в карты деформации поверхности.

Метод корреляции цифровых изображений позволяет бесконтактным образом количественно характеризовать процессы, развивающиеся на поверхности нагруженных материалов с пространственным разрешением до нескольких микрон. В то же время, в связи развитием технологий производства высококачественной регистрирующей фотоаппаратуры, увеличением разрешения фото- и видеодатчиков, развитием цифровых методов высокоскоростной регистрации видеоданных возникает необходимость повышения быстродействия расчетных алгоритмов в методе корреляции цифровых изображений. Кроме того, при обработке экспериментальных данных (изображений) наличие шумов, низкое качество подготовки поверхности, существенное изменение рельефа и т. п. нередко вызывают ошибки в определении перемещений, что, в свою очередь, обусловливает появление ошибок в оценке деформации.

Помимо этого, необходимость обработки большого объема разнообразных экспериментальных данных требует разработки способов подбора параметров для алгоритмов построения векторных полей и оценки деформации под конкретные условия получения фото- и видеоинформации (данных) и заданные условия приложения внешнего воздействия. Это, в свою очередь, обусловливает необходимость развития способа автоматического выбора расчетных параметров. Таким образом, повышение быстродействия и помехоустойчивости алгоритмов оценки деформации на поверхности материалов методом корреляции цифровых изображений, а также реализация способа автоматического выбора параметров алгоритма определения перемещений являются актуальными задачами исследований.

В работе представлены результаты разработки и исследований алгоритмов и программ обработки и анализа изображений поверхности нагруженных материалов в задачах оценки процессов пластической деформации и разрушения. Приведено описание алгоритмов, предназначенных для повышения быстродействия и помехоустойчивости определения перемещений и оценки деформации в методе корреляции цифровых изображений. Реализованы и исследованы алгоритмы для количественной оценки деформации путем расчета различных информативных признаков с привлечением фурье- и вейвлет спектрального анализа, а также интегральных статистических параметров. В основе интерпретации рассчитываемых количественных характеристик лежит выявление характерных стадий их изменения при сопоставлении с типичными стадиями макрохарактеристик развития деформационных процессов.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Babailov N.A., 3, 8, 342
Balokhonov R.R., 16, 26, 27, 29, 76, 91, 123
Batukhtina E.E., 16, 26, 27, 29, 76
Beketov A.R., 51
Belyakova E., 174
Butakov S.V., 172
Davydov Yu.S., 31
Derzhanskii V., 98
Dimitrov R., 157, 158
Fayzullin A.Z., 178
Fayzullin I.Z., 178
Filippov A.S., 178
Gorbunov A.V., 85
Gorkunov E.S., 157, 158
Hats Yu.I., 143
Iskhakov R.F., 51
Ivanova Y., 104
Kabakova A.A., 81
Kalashnikov V., 174
Karzhavin V.V., 172, 206
Kazachenok M.S., 26, 76
Kostin V.N., 81
Kroll L., 176
Krymskiy S.V., 148
Kuzevanov V.F., 157, 158
Lei M.K., 146, 147
Loginov Yu.N., 3, 8
Lupenko S.A., 143
Lytvynenko I.V., 143
Malikov A.G., 85
Markushev M.V., 148
Martynov S.A., 29, 76, 91
Maruschak P.O., 4, 143
Menou A., 143
Moskvichev E.V., 44
Moskvin R., 174
Musin I.N., 178
Nikiforov A.A., 176
Ogorodnikov A.I., 17
Ogorodnikova O.M., 31
Okhotina N.A., 176
Orishich A.M., 85
Pan X.M., 147
Panin A.V., 27, 76
Panin S.V., 4, 143
Panin V.E., 85
Partalin T., 104
Pervukhin A.E., 3
Pervukhina D.N., 8
Ploshikhin V., 123
Pochivalov Y.I., 85
Polianskiy L.I., 8
Polyanskii S.N., 172
Porseva A.M., 81
Povolotskaya A., 104
Prosviryakov E.Yu., 113
Rinberg R., 176
Romanova V.A., 16, 26, 27, 29, 76, 91, 123
Seniv V.M., 172, 206
Seregin S.V., 202
Sergeev V.P., 4
Shakhidjanov V.S., 16
Shakhijanov V.S., 27, 29, 76
Shakhijanova N.O., 27
Shishin N.N., 342
Shleenkov A.S., 206
Shubina A.N., 51
Sitdikov O.Sh., 148
Smirnova A.S., 85
Sokolov A.V., 206
Taratorkin A., 98
Taratorkin I., 98
Thomas S., 230
Vasilenko O.N., 81
Vlasov I.V., 4
Vlasova S.S., 113
Volfson S.I., 176, 178
Xiong Tianying, 196
Yu Bao Hai, 196
Zadvorkin S.M., 157, 158
Zhang Y.Y., 147
Zhu B., 146
Zhu X.P., 147
Zinoviev A., 123
Zinoviev A.V., 29, 76, 91
Zinovieva O., 123
Zinovieva O.S., 29, 76, 91
Абашкин Е.Е., 49
Акилова И.Б., 248
Аксёнова К.В., 179
Александров С.Е., 47
Алексеева Е.Л., 77
Алексиев А.Р., 103
Альхименко А.А., 77
Аммосова О.А., 73, 262
Арсеньев Д.Г., 93
Астафуров С.В., 196
Бабайлов Н.А., 7, 112
Баженов А.В., 151, 152, 153, 154
Бажуков П.С., 109
Балаев Э.Ю., 105
Балина О.В., 80

Балымов К.Г., 282
Банников М.В., 116
Банникова И.А., 310
Баранникова С.А., 32, 198
Баранов А.В., 256
Баранов Г.Л., 220
Барановский А.В., 258
Бачурихин В.П., 119
Баяндин Ю.В., 125, 127, 129, 317, 348
Белозеров Г.А., 67, 74
Белоногов Н.С., 107, 122
Белоцерковский М.А., 230
Белявская О.А., 268
Беляев А.К., 93, 94
Беляев А.Н., 325
Белякова Е.А., 173
Бердников К.В., 130
Березин И.М., 323
Берестова С.А., 38, 54, 240
Бехер С.А., 338
Биаков А., 162
Билалов Д.А., 119, 125, 319
Билалов Д.Х., 144
Бледнова Ж.М., 105, 142
Богданов А.С., 327
Богданов Д.Г., 327
Борисова А.Д., 228
Ботвин Г.В., 236
Бочкарева А.В., 198
Булдакова И.В., 62
Бульбович Р.В., 48
Бурков М.В., 362
Бурмашева Н.В., 59, 60
Буров А.Е., 92
Буров С.В., 165, 168
Бурсук В.И., 360
Бутаков С.В., 171
Бухаров С.Н., 103
Быков А.А., 290
Быкова Т.М, 210
Бяков А. В., 244
Бяков А.В., 362
Вавилов В.П., 268
Вакулюк В.С., 212, 214
Васильев С.В., 75
Васильев С.Н., 360
Васильева М.А., 73, 260
Васьковский В.О., 282
Ватульян А.О., 69, 343
Вахонина К.Д., 358, 359
Веретенникова И.А., 43, 45, 64
Веселов И.Н., 120
Веселова В.Е., 106, 150
Ветошкин С.В., 348
Вильдеман В.Э., 48, 107, 109, 118, 122, 133, 300, 315
Вичужанин Д.И., 145, 149, 167
Владимиров А.П., 41, 106
Вовкотруб Э.Г., 155
Волегов П.С., 216, 224
Волков С.С., 200
Волкова Л.В., 62
Волкова Т.А., 200
Вольнов К.М., 139, 140
Вольфсон С.И., 175, 177
Воробьев О.А., 238
Воронин С.В., 89, 90, 350, 355
Вшивков А.Н., 115
Габбасова М.А., 284
Гагарин А.Ю., 187
Гагиев В.В., 170
Галактионова А.В., 110, 111
Галяев А.А., 360
Герасимов А.И., 236
Гладковский С.В., 106, 136, 150, 248
Глот И.О., 290
Гоголева О.В., 169
Голиков Н.И., 72, 102
Головнев И.Ф., 33
Головнева Е.И., 33
Гольдштейн Р.В., 12
Гончарова Е.Н., 333
Горкунов Э.С., 34, 55, 106, 126, 159, 160, 161, 167, 354, 360
Горулева Л.С., 126, 161, 167, 354
Горшков А.В., 131, 132
Григорьев А.С., 196
Григорьев С.С., 344
Гриняев Ю.В., 46
Грищенко А.И., 94
Громов В.Е., 9, 10, 179, 187, 333
Гурьев Ю.В., 360
Гусев Г.Н., 66
Давыдова М.Л., 71
Давыдова М.М., 114, 135
Давыдова Н.А., 40, 57
Давыдченко М.А., 222
Данзанова Е.В., 236
Данилов С.В., 120
Двойников Д.А., 136
Дедков Д.В., 294
Дементьев В.Б., 321
Демидов С.А., 358
Дмитриев А.И., 37, 138

Дмитриев С.Ф., 222
Доронин С.В., 166
Дружинин А.В., 41
Друкаренко Н.А., 41, 106
Дударев В.В., 69
Дураков В.Г., 258
Дьяконов А.А., 71, 95
Егоров Д.Ю., 139, 140
Елшина В.А., 155, 156
Елшина Л.А., 149, 155, 156
Емалетдинов А.К., 110, 111
Емельянов И.Г., 28
Епин В.В., 78
Еремин А., 162
Еремин А.В., 242, 244, 362
Железняк Л.М., 7
Желнин М.С., 306
Жилин С.Г., 42, 49
Житникова К.А., 127
Жихарева И.Г., 238
Забродина А.А., 344
Задворкин С.М., 55, 126, 159, 160, 161, 167, 354, 360
Зайцев А.В., 286, 288, 294, 296, 298
Зайцев Д.В., 25, 135, 335, 344
Залазинский А.Г., 52, 323
Занг З., 56
Засыпкин А.Д., 321
Зезин Ю.П., 361
Зорин В.А., 284
Зубко И.Ю., 345
Зуев Л.Б., 32, 198
Иванов Ю.Ф., 9, 10, 179, 333
Иванова О.В., 10
Ивашов А.С., 25
Изюмова А.Ю., 115, 306
Ильиных А.В., 292
Ишков А.В., 222
Кабанова А.В., 56
Казаков А.Л., 21
Казеев В.Г., 150
Калашников В.И., 173
Калинин Г.Ю., 34
Каманцев И.С., 41, 106, 150, 168
Канюков С.И., 14
Карамышев А.П., 128
Каржавин В.В., 171, 204
Карпов В.В., 191
Кирпичёв В.А., 212
Кисельникова Л.П., 56
Ковтанюк Л.В., 264
Козинцев В.М., 12
Козулин А.А., 268
Кокшаров В.С., 296, 298
Колмакова Т.В., 24
Колмогоров Г.Л., 353
Колубаев Е.А., 138
Комаров О.Н., 42, 49
Комиссарова И.А., 9, 10
Кондратьев Н.С., 352
Коноваленко Ив.С., 138
Коноваленко Иг.С., 108, 138
Коновалов А.В., 14, 30, 59, 60, 67, 74
Коновалов Д.А., 43
Коновалов С.В., 9, 10, 179, 187
Корешкова Е.В., 232
Коржова В.В., 258
Кормышев В.Е., 9
Коробов Ю.С., 230
Королева Л.Ф., 11
Коростелева Е.Н., 258
Корх М.К., 137, 349
Корх Ю.В., 349
Косинов Д.А., 10
Костин С.К., 77
Котенева Н.В., 226, 228
Красникова И.В., 50
Криницын М.Г., 258
Кролл Л., 175
Крылова Т.А., 134
Крючков Д.И., 52
Кудюков Е.В., 282
Кузнецов А.В., 28, 357
Кузнецова Е.В., 351, 353
Кулак С.М., 256
Кулемина А.А., 232
Кутенева С.В., 150
Кутепов С.М., 153
Ластовкина Е.Н., 24
Левина А.В., 358, 359
Ледяев М.Е., 89, 90, 350, 355
Лепаловский В.Н., 282
Лепихин С.В., 136
Лехов О.С., 144
Ли Ю.В., 198
Лобанов Д.С., 122
Лобанов М.Л., 120
Лобачев А.М., 94
Лобода П.С., 89, 90, 350, 355
Логинов Ю.Н., 15
Ломакин Е.В., 133, 315
Лунев А.Г., 198
Лысиков М.В., 13
Любутин П.С., 362

Лязгин А.О., 88
Ляпунова Е.А., 135
Лях В.Д., 170
Майер А.Ф., 84
Макаров А.В., 34, 35, 36, 40, 57, 58, 250, 270, 354
Макаров П.В., 39
Макаров С.В., 13, 246, 327
Макрушина А.Н., 246
Максименко А.А., 226, 228
Максимов П.В., 53
Максимова Е.М., 102
Маликов В.Н., 222
Малыгина И.Ю., 35, 36, 40, 57
Мандра Ю.В., 25
Мансырев Д.И., 94
Маркова М.А., 274
Мартусевич Е.В., 10
Масючок О.П., 103
Матвеенко В.П., 117
Матц О.Э., 87
Мержиевский Л.А., 33
Мехоношина Т.Г., 129
Миронов В.И., 28, 101
Мисюра Н.Е., 38
Митюшов Е.А., 38, 54, 240
Михайлова Н.В., 70
Мичуров Н.С., 64
Модестов В.С., 94
Моисеенко Д.Д., 53
Морозов Н.Ю., 360
Москвин Р.Н., 173
Москвичев В.В., 86, 166
Муйземнек О.Ю., 14, 47, 67, 74
Муравьев В.В., 62, 284
Муравьева О.В., 284
Мурадымов Р.В., 149, 155
Муратов К.Р., 276, 280, 312, 330
Мусин И.Н., 177
Мушников А.Н., 159
Мушникова С.Ю., 34, 77, 160
Мясникова М.В., 30
Наймарк О.Б., 116, 119, 124, 125, 127, 129, 310, 317, 319, 346, 348
Нассонов В.В., 80
Недин Р.Д., 68, 69
Некрасов И.И., 128
Нерадовский Д.Ф., 276, 280, 330
Нестеренко А.В., 128, 141, 145, 323
Нестеров С.А., 343
Нефедова О.А., 22, 58
Никифоров А.А., 175
Никонов А.Ю., 37
Ничипурук А.П., 137
Новиков В.Ф., 256, 276, 280, 312, 330
Obabkov N.V., 51
Обирин К.Д., 346
Оборин В.А., 119, 125, 319
Обухов И.А., 151
Овчаренко В.Е., 196
Огнева М.С., 349
Озерец Н.Н., 359
Озерных В.С., 224
Осинцева А.Л., 34, 35, 270
Осипенко Н.М., 12
Охотина Н.А., 175
Ошмарин Д.А., 61
Павлов В.Ф., 214
Панин А.В., 88
Панин В.Е., 53, 65
Панин С., 162
Панин С.В., 53, 242, 244, 362
Пантелеев И.А., 127, 346
Панфилов П.Е., 56, 135, 335
Панченко Г.Л., 264
Панченко Е.Н., 151
Партин А.С., 59
Паршин В.С., 128
Пелегов Д.В., 155
Перетягин П.Ю., 340
Перовская М.В., 134
Перфильева Н.В., 226, 228
Перышкин А.Ю., 39
Петров К.В., 284
Петрова П.Н., 84, 169, 274
Петухова Е.С., 50
Печеркина Н.Л., 34, 354
Пивков А.В., 94
Плехов О.А., 115, 302, 304, 306
Плотников В.А., 13, 246, 327
Поволоцкая А.М., 55
Подкина Н.С., 351
Полежаев Н.И., 101
Полетика И.М., 134
Поляков И.А., 87, 163
Поляков И.Ю., 362
Полянский А.М., 93
Полянский В.А., 93, 94
Полянский С.Н., 171
Попков А.А., 278
Попов А.В., 42, 49
Попов А.Л., 12
Попов С.Н., 169
Потапов А.И., 136

Потянихин Д.А., 49
Почивалов Ю.И., 65
Предеин В.В., 49
Прибытков Г.А., 258
Просвиряков Е.Ю., 23, 131, 132
Прохоров А.Е., 302
Пряхина В.И., 155
Псахье С.Г., 108, 138, 196
Пугачева Н.Б., 18, 19, 64, 210, 356
Пузанов М.П., 15
Пургин А.А., 82
Путилова Е.А., 55, 160, 161
Пучков А.В., 164
Пышминцев И.Ю., 120
Ражиков В.Н., 325
Реков А.М., 189
Ригмант М.Б., 137, 349
Ринберг Р., 175
Роговая С.А., 34
Роговой А.А., 100
Романов Д.А., 187, 333
Росляков П.С., 208
Рошаль С.М., 151
Русинов П.О., 105, 142
Савельева Н.В., 317
Саврай Р.А., 34, 35, 36, 40, 57, 357
Сагалаков А.М., 222
Сазанов В.П., 212, 214
Салихянов Д.Р., 136
Сальников А.Ф., 79
Самойленко В.В., 87, 163
Самойлова Г.В., 58
Сандомирский С.Г., 121
Сарычев В.Д., 187
Селезнев А.Е., 340
Семенов А.А., 191
Семёнова О.Ю., 214
Семухин Б.С., 6, 185
Сенаева Е.И., 19, 64
Сенив В.М., 171, 204
Серков К.В., 54
Сероваев Г.С., 61
Сидоров М.М., 72, 102
Сизов В.В., 9
Скорынина П.А., 270
Скрипняк В.А., 268
Скрипняк В.В., 268
Словиков С.В., 48
Смирнов А.С., 30, 47, 67, 74, 170
Смирнов С.В., 30, 43, 45, 128, 141, 145, 248, 356
Смирнова А.С., 65
Смирнова Е.О., 45, 47, 64, 149, 356
Смирнова Н.В., 238
Соболева Н.Н., 35, 36
Соковиков М.А., 119, 125, 129, 319
Соколкин Ю.В., 286
Соколов А.В., 204
Соколова М.Д., 71, 95, 254
Солис Н.В., 340
Соловей В.Д., 15
Сороколетов А.Ю., 268
Соснин А.А., 42, 49
Спаскова Е.М., 118
Спевак Л.Ф., 21, 22, 23, 58, 112
Спивак Н.М., 344
Староверов О.А., 122
Старостин Н.П., 73, 83, 260, 262
Стволова С.С., 345
Степанова Л.В., 208, 266
Степанова Л.Н., 20
Столбова О.С., 99, 100
Стошка М., 93
Стружанов В.В., 96, 97, 130
Суворов Е.А., 150
Судаков И.А., 298
Сулейманов Р.Н., 308
Сундер Р., 162, 242, 244
Суслов А.Г., 234
Сыч Т.В., 338
Тарасов А.Г., 6, 185
Ташкинов А.А., 294
Ташкинов М.А., 70
Тверяков А.М., 218
Тельканов М.А., 216
Темерова М.С., 300
Тересов А.Д., 10
Терехина А.И., 304
Тимофеев К.М., 230
Титков В.В., 362
Титов В.Г., 52
Тихонов К.В., 312
Тихонов Р.П., 102
Тихонов Р.С., 83
Тихончук И.С., 79
Токтогулов Ш.Ж., 335
Толипов Х.Б., 193
Торресильяс Р., 340
Третьяков Д.А., 94
Третьяков М.П., 118, 133
Третьякова Т.В., 315
Тришин В.Н., 41
Трусов П.В., 63, 181, 272
Уваров С.В., 114, 310, 319

Устинов В.П., 276, 312
Файзуллин А.З., 177
Файзуллин И.З., 177
Федоров А.Л., 274
Федоров А.Ю., 117
Федоров Ю.Ю., 75
Федулов А.А., 128
Феропонтов В.А., 226, 228
Филиппов А.С., 177
Фукалов А.А., 286, 288
Хакимов А.Г., 5
Халевицкий Ю.В., 30, 59, 60
Харьков А.А., 77
Хачай А.Ю., 183
Хачай О.А., 183
Худорожкова Ю.В., 165, 168
Цветков Р.В., 78
Частоедов В.А., 352
Чекалкин А.А., 308
Челюбеев Д.А., 12
Чемезов В.О., 362
Черемицина Э.Р., 354
Чернова В.В., 20
Чернядьева Е.А., 161
Чертков А.К., 151, 152, 153, 154
Чертков К.А., 152, 153, 154
Чертова Н.В., 46
Чечулина Е.А., 252
Чудинов В.В., 114, 125, 319
Чулков А.О., 268
Чучкова Л.В., 163
Шадрин В.К., 212
Шадринов Н.В., 95, 254
Шалыгин М.Г., 234
Шарапова В.А., 358
Шардаков И.Н., 66, 78, 290
Шарифуллина Э.Р., 63
Шаркеев Ю.П., 268
Шатунова А.А., 155, 156
Швейкин А.И., 63, 181
Швейкин В.П., 74, 128, 141
Шестаков А.П., 61, 66, 290
Шестопалов Ю.А., 358
Шибаев В.А., 240
Шилько Е.В., 196
Шлеенков А.С., 204
Шляхова Г.В., 32, 198
Шмидт В.В., 238
Штин А.С., 218
Штукин Л.В., 94
Шугуров А.Р., 88
Шур В.Я., 155
Юровских А.С., 270
Ягудин Г.А., 359
Яковлев Ю.А., 93
Яковлева А.А., 120
Якушенко Е.И., 159, 360
Янкин А.С., 48
Янц А.Ю., 272

СОДЕРЖАНИЕ

THE STRAIN STATE CALCULATION DURING THE MULTIPASS WIRE DRAWING
Loginov Y.N., Pervukhin A.E., Babailov N.A. 3

INFLUENCE OF HIGH-INTENSITY TREATMENT BY IONS Zr FLOW ON IMPACT STRENGTH OF 12Cr1MoV STEEL
Panin S.V., Maruschak P.O., Vlasov I.V., Sergeev V.P. 4

ДИАГНОСТИКА ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА ТРУБОПРОВОДА ПО СОБСТВЕННЫМ ЧАСТОТАМ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ
Хакимов А.Г. 5

КРИТЕРИЙ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПОР ЛЭП
Семухин Б.С., Тарасов А.Г. 6

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА КАЧЕСТВЕННЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЭЛЕКТРО-ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕДИ
Железняк Л.М., Бабайлов Н.А. 7

THE INDUSTRIAL RECYCLING OF TECHNOGENIC WASTES AND MINERAL PROCESSING
Polianskiy L.I., Loginov Y.N., Pervukhina D.N., Babailov N.A. 8

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НАПЛАВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ
Коновалов С.В., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Комиссарова И.А., Сизов В.В. 9

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНА ВТ1-0 НА ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ, ПРИВОДЯЩЕЙ К УВЕЛИЧЕНИЮ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
Комиссарова И.А., Коновалов С.В., Косинов Д.А., Громов В.Е., Мартусевич Е.В., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д., Иванова О.В. 10

НАНОДИСПЕРСНЫЕ ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ ОКСИДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ФИНИШНОГО ПОЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ
Королева Л.Ф. 11

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ ПАНОРАМНОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Осипенко Н.М., Попов А.Л., Челюбеев Д.А. 12

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ СТРУКТУРНЫЙ ПЕРЕХОД И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВАХ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ
Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В. 13

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОКОВОК В САПР ТЕХНОЛОГИИ КОВКИ ВАЛОВ НА ПРЕССАХ
Канюков С.И., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю. 14

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ С УЧЕТОМ СКОРОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ
Соловей В.Д., Логинов Ю.Н., Пузанов М.П. 15

CRYSTAL PLASTICITY MODEL FOR THE DEFORMATION BEHAVIOR OF ALUMINUM SINGLE CRYSTALS
Batukhtina E.E., Romanova V.A., Balokhonov R.R., Shakhidjanov V.S. 16

FINITE-ELEMENT SIMULATION OF SCRATCHING A COATED BRITTLE PLATE
Ogorodnikov A.I. 17

НАВОДОРАЖИВНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
Пугачева Н.Б. 18

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ AL/SIC НА ХАРАКТЕР КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
Пугачева Н.Б., Сенаева Е.И. 19

МЕТОДИКА ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ТЕНЗОМЕТРИИ
Степанова Л. Н., Чернова В. В. 20

О ПОСТРОЕНИИ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ КРАЕВЫХ РЕЖИМАХ С ВЫРОЖДЕНИЕМ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ
Спевак Л.Ф., Казаков А.Л. 21

РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ВЫРОЖДЕНИЕМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДВОЙСТВЕННОЙ ВЗАИМНОСТИ
Спевак Л.Ф., Нефедова О.А. 22

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СТАЦИОНАРНОЙ И НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ СЛОИСТЫХ ДИССИПАТИВНЫХ НЕСЖИМАЕМЫХ СРЕД
Просвиряков Е.Ю., Спевак Л.Ф. 23

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФРАГМЕНТОВ ГУБЧАТОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ
Ластовкина Е.Н., Колмакова Т.В. 24

ДЕНТИН – САМОПОДОБНАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
Зайцев Д.В., Ивашов А.С., Мандра Ю.В. 25

STRAIN-INDUCED SURFACE ROUGHENING IN POLYCRYSTALLINE ALUMINUM ALLOYS. EXPERIMENT AND SIMULATION
Romanova V.A., Balokhonov R.R., Kazachenok M.S., Batukhtina E.E. 26

CRYSTAL PLASTICITY SIMULATIONS FOR THE DEFORMATION BEHAVIOR OF POLYCRYSTALLINE TITANIUM
Romanova V.A., Balokhonov R.R., Panin A.V., Shakhijanov V.S., Shakhijanova N.O., Batukhtina E.E. 27

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ КАБИНЫ ЛОКОМОТИВА ПРИ НЕРЕГЛАМЕНТИРОВАННЫХ НАГРУЗКАХ
Емельянов И.Г., Миронов В.И., Кузнецов А.В. 28

MESOMECHANICAL RESPONSE OF THE MATERIAL MICROSTRUCTURE FOMED ON THE ADVANCING SIDE OF THE FRICTION STIR WELDED ALUMINUM
Balokhonov R.R., Romanova V.A., Batukhtina E.E., Shakhijanov V.S., Martynov S.A., Zinoviev A.V., Zinovieva O.S. 29

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОФАЗНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПРОСТОМ НАГРУЖЕНИИ
Смирнов С.В., Коновалов А.В., Мясникова М.В., Халевицкий Ю.В., Смирнов А.С. 30

COMPUTATION OF TEMPERATURE FIELD IN WELDING SIMULATION
Ogorodnikova O.M., Davydov Yu.S. 31

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БИМЕТАЛЛА КОНСТРУКЦИОННАЯ УГЛЕРОДИСТАЯ СТАЛЬ – НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ
Шляхова Г.В., Баранникова С.А., Зуев Л.Б. 32

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ НАНОКРИСТАЛЛА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ
Мержиевский Л.А., Головнев И.Ф., Головнева Е.И. 33

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ 04Х20Н6Г11М2АФБ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ
Саврай Р.А., Макаров А.В., Горкунов Э.С., Печеркина Н.Л., Роговая С.А., Осинцева А.Л., Калинин Г.Ю., Мушникова С.Ю. 34

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ
Саврай Р.А., Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. 35

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЛАЗЕРНОГО NiCrBSi ПОКРЫТИЯ, УПРОЧНЕННОГО ФИНИШНОЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ
Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю., Саврай Р.А. 36

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ SIO2 И УГЛЕРОДА В АМОРФНО-ПОДОБНОМ СОСТОЯНИИ
Дмитриев А.И., Никонов А.Ю. 37

ПРИМЕНЕНИЕ ГАУССОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НА ГРУППЕ SO(3) ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
Берестова С.А., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А. 38

РОЛЬ МЕДЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН В ФОРМИРОВАНИИ ОЧАГОВ РАЗРУШЕНИЯ
Макаров П.В., Перышкин А.Ю. 39

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 50 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ
Саврай Р.А., Макаров А.В., Малыгина И.Ю., Давыдова Н.А. 40

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОРГСТЕКЛЕ
Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Тришин В.Н., Дружинин А.В. 41

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ И РАЗРУШЕНИЯ ПРЕССОВОК ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ
Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А., Попов А.В. 42

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНОГО ШВА БИМЕТАЛЛА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
Веретенникова И.А., Коновалов Д.А., Смирнов С.В. 43

THE MECHANICAL TESTING OF COMPOSITE SHELL MATERIAL OF COMPOSITE OVERWRAPPED PRESSURE VESSEL
Moskvichev E.V. 44

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОГО ОЛИГОМЕРА, НАПОЛНЕННОГО ДИОКСИДОМ КРЕМНИЯ, С ПОМОЩЬЮ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ
Смирнов С.В., Веретенникова И.А., Смирнова Е.О. 45

ДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УПРУГИХ ВОЛН НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЖЕСТКОЙ ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА
Чертова Н.В., Гриняев Ю.В. 46

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА 01560 ПОСЛЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
Смирнов А.С., Смирнова Е.О., Александров С.Е., Муйземнек О.Ю. 47

ОПИСАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ДВУХЧАСТОТНЫХ ЗАКОНАХ НАГРУЖЕНИЯ
Янкин А.С., Бульбович Р.В., Словиков С.В., Вильдеман В.Э. 48

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
Комаров О.Н., Жилин С.Г., Потянихин Д.А., Предеин В.В., Абашкин Е.Е., Соснин А.А., Попов А.В. 49

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ И БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ КОМПОЗИТОВ
Петухова Е.С., Красникова И.В. 50

THE PRESSING PARAMETERS DEPENDENCE FOR THE COMPACTION OF REFRACTORY METALS POWDERS
Shubina A.N., Beketov A.R., Obabkov N.V., Iskhakov R.F. 51

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТОВ ИЗ ТИТАНОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ
Залазинский А.Г., Крючков Д.И., Титов В.Г. 52

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЕРШИНЫ НАДРЕЗА НА ХАРАКТЕР ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12Х1МФ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ: ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
Моисеенко Д.Д., Максимов П.В., Панин С.В., Панин В.Е. 53

ВЕКТОРИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ МОДУЛЯ ЮНГА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ГПУ-СТРУКТУРОЙ
Серков К.В., Берестова С.А., Митюшов Е.А. 54

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕДЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНЫХ ЗОН ТРУБЫ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПРИ УПРУГОМ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ (СЖАТИИ)
Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А. 55

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ДЕНТИНА
Кабанова А.В., Панфилов П.Е., Занг З., Кисельникова Л.П. 56

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ ЗАКАЛЕННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ
Макаров А.В., Давыдова Н.А., Малыгина И.Ю., Саврай Р.А. 57

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
Спевак Л.Ф., Нефедова О.А., Макаров А.В., Самойлова Г.В. 58

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИЙ РЯДА МЕТОДОВ ПОДПРОСТРАНСТВ КРЫЛОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ГЕТЕРОГЕННЫХ КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМАХ
Халевицкий Ю.В., Бурмашева Н.В., Коновалов А.В., Партин А.С. 59

ПОДХОД К ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СБОРКЕ МАТРИЦЫ ЖЁСТКОСТИ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ
Халевицкий Ю.В., Бурмашева Н.В., Коновалов А.В. 60

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
Ошмарин Д.А., Сероваев Г.С., Шестаков А.П. 61

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСЕ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА
Муравьев В.В., Волкова Л.В., Булдакова И.В. 62

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В РЕЖИМЕ СТРУКТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ
Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Швейкин А.И. 63

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА И АУСТЕНИТНОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ
Пугачева Н.Б., Мичуров Н.С., Смирнова Е.О., Веретенникова И.А., Сенаева Е.И. 64

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 09Г2С
Почивалов Ю.И., Смирнова А.С., Панин В.Е. 65

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ И БЕТОНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ
Гусев Г.Н., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. 66

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА 01570С В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЕФОРМАЦИЙ
Коновалов А.В., Смирнов А.С., Муйземнек О.Ю., Белозеров Г.А. 67

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И РЕМОНТ ПОВРЕЖДЕННОГО ТРУБОПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ
Недин Р.Д. 68

О МОДЕЛИРОВАНИИ И МЕТОДАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СТЕРЖНЕ
Ватульян А.О., Дударев В.В., Недин Р.Д. 69

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ СО СЛУЧАЙНОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ
Михайлова Н.В., Ташкинов М.А. 70

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО СТРУКТУРНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ СМЕСИ ПОЛИМЕРОВ
Соколова М.Д., Давыдова М.Л., Дьяконов А.А. 71

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
Сидоров М.М., Голиков Н.И. 72

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ТРУБ В РАСТРУБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
Старостин Н.П., Васильева М.А., Аммосова О.А. 73

РЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Zn-Mg-Cu С 10% СОДЕРЖАНИЕМ SiC
Смирнов А.С., Белозеров Г.А., Коновалов А.В., Швейкин В.П., Муйземнек О.Ю. 74

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАВЕРС ОПОР ДЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ИЗ ПУЛТРУЗИОННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА
Васильев С.В., Федоров Ю.Ю. 75

MESOSCOPIC PLASTIC STRAIN LOCALIZATION IN TITANIUM WITH MODIFIED SURFACE LAYER
Balokhonov R.R., Martynov S.A., Romanova V.A., Panin A.V., Kazachenok M.S., Batukhtina E.E., Shakhijanov V.S., Zinoviev A.V., Zinovieva O.S. 76

ИССЛЕДОВАНИЕ СКЛОННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ В СЕРОВОДОРОДНОЙ СРЕДЕ
Мушникова С.Ю., Костин С.К., Харьков А.А., Альхименко А.А., Алексеева Е.Л. 77

АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА
Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н. 78

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИИХ ПРОЦЕССОВ В ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЯХ ТУРБОМАШИН
Тихончук И.С., Сальников А.Ф. 79

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ
Балина О.В., Нассонов В.В. 80

THREE-DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF MAGNETIC FIELD AND FLUX IN LOCALLY MAGNETIZED TWO-LAYER FERROMAGNETIC OBJECTS
Kostin V.N., Vasilenko O.N., Porseva A.M., Kabakova A.A. 81

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ ДЛЯ БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
Пургин А.А. 82

ТЕПЛОВАЯ ДИАГНОСТИКА ТРЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА
Тихонов Р.С., Старостин Н.П. 83

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА И ДИСКРЕТНЫХ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА
Петрова П.Н., Майер А.Ф. 84

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF VT23 WELDED JOINTS RESULTING FROM LASER WELDING
Smirnova A.S., Malikov A.G., Panin V.E., Pochivalov Y.I., Orishich A.M., Gorbunov A.V. 85

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ, РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
Москвичев В.В. 86

ВНЕВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ НАПЛАВКА Ti-Ta-Zr СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТИТАНА ВТ1-0
Самойленко В.В., Поляков И.А., Матц О.Э. 87

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Au-Ni
Лязгин А.О., Шугуров А.Р., Панин А.В. 88

ВЛИЯНИЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1
Воронин С.В., Ледяев М.Е., Лобода П.С. 89

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1 С «ШАХМАТНЫМ» РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОР
Воронин С.В., Ледяев М.Е., Лобода П.С. 90

THE INFLUENCE OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE STEEL SUBSTRATE ON THE MACROSCOPIC STRENGTH OF THE COATED MATERIAL
Balokhonov R.R., Zinoviev A.V., Romanova V.A., Martynov S.A., Zinovieva O.S. 91

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ АНАЛИЗА НДС МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
Буров А.Е. 92

ИЗМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСТВОРЕННОГО ВОДОРОДА ПОСЛЕ УЛЬТАЗВУКОВОЙ ПИН-ОБРАБОТКИ ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ СВАРНОГО ШВА
Полянский В.А., Беляев А.К., Арсеньев Д.Г., Яковлев Ю.А., Полянский А.М., Стошка М. 93

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ
Беляев А.К., Грищенко А.И., Лобачев А.М., Мансырев Д.И., Модестов В.С., Пивков А.В., Полянский В.А., Третьяков Д.А., Штукин Л.В. 94

ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ РЕЗИН С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ АГРЕССИВО- И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
Соколова М.Д., Дьяконов А.А., Шадринов Н.В. 95

НАПРЯЖЕНИЯ В ПЛОСКИХ ОБРАЗЦАХ СВИДЕТЕЛЯХ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ
Стружанов В.В. 96

СЖАТИЕ ДВУХСЛОЙНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА
Стружанов В.В. 97

FORECASTING PARAMETRIC RESONANCE OSCILLATIONS OF TRANSMISSION FRICTION DISCS ON THE BASIS OF HIGH PRECISION DETERMINATION OF THEIR MODAL CHARACTERISTICS
Derzhanskii V., Taratorkin A., Taratorkin I. 98

ПОСТРОЕНИЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА И ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
Столбова О.С. 99

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ В ФЕРРОМАГНИТНОМ СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
Роговой А.А., Столбова О.С. 100

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОНКОСТЕНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКИЙ ПУТЕМ ДЕМПФИРОВАНИЯ ПЕНОПЛАСТОМ
Миронов В.И., Полежаев Н.И. 101

ДИАГНОСТИКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА
Голиков Н.И., Сидоров М.М., Тихонов Р.П., Максимова Е.М. 102

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БАНДАЖЕЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДОМ НИЗКОЧАСТОТНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ
Алексиев А.Р., Масючок О.П., Бухаров С.Н. 103

COMPARATIVE MEASUREMENTS OF THE STEEL DEFORMATION DURING THE TENSILE USING ULTRASONIC METHOD AND MAGNETIC BARKHAUSEN NOISE
Ivanova Y., Partalin T., Povolotskaya A. 104

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ TiNiHfCu-hNB-Co
Русинов П.О., Бледнова Ж.М., Балаев Э.Ю. 105

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В МОНОЛИТНЫХ И СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
Гладковский С.В., Владимиров А.П., Горкунов Э.С., Каманцев И.С., Веселова В.Е., Друкаренко Н.А. 106

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ МНОГООСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ
Белоногов Н.С., Вильдеман В.Э. 107

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ, ДЛЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
Коноваленко Иг.С., Псахье С.Г. 108

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЕ КОНСОЛЬНОЙ БАЛКИ С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ
Бажуков П.С., Вильдеман В.Э. 109

ВЛИЯНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ НА ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАНОСТРУКТУРНОМ СПЛАВЕ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ УСТАЛОСТИ
Емалетдинов А.К., Галактионова А.В. 110

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО РАЗМЕРА ЗАРОЖДЕНИЯ ПОР В ЖАРОПРОЧНОМ НАНОСТРУКТУРНОМ СПЛАВЕ ПРИ ТЕРМОУСТАЛОСТИ
Емалетдинов А.К., Галактионова А.В. 111

РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
Спевак Л.Ф., Бабайлов Н.А. 112

STATIONARY TWO DIMENSIONAL AND AXISYMMETRIC CONVECTION OF THE HIGHLY VISCOUS NEWTONIAN FLUID AT REALIZATION ON HEAT EXCHANGE BORDERS UNDER THE LAW OF NEWTON – RIKHMAN
Vlasova S.S., Prosviryakov E.Yu. 113

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЁМКОСТИ И ПРОЧНОСТИ КЕРАМИКИ С РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ
Уваров С.В., Давыдова М.М., Чудинов В.В. 114

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ОБОСНОВАННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛАХ
Плехов О.А., Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н. 115

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В РЕЖИМАХ МНОГО- И ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПРИ КОНТАКТЕ С ЖИДКИМ ГАЛЛИЕМ
Банников М.В., Наймарк О.Б. 116

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОКРЕСТНОСТИ ОСОБЫХ ТОЧЕК
Матвеенко В.П., Федоров А.Ю. 117

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕГИСТРАЦИИ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН
Спаскова Е.М., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. 118

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ГИГАЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ
Оборин В.А., Бачурихин В.П., Соковиков М.А., Билалов Д.А., Наймарк О.Б. 119

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕКСТУРЫ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА БЕСШОВНЫХ ТРУБ
Пышминцев И.Ю., Веселов И.Н., Яковлева А.А., Лобанов М.Л., Данилов С.В. 120

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МЕТАЛЛА ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ В НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ
Сандомирский С.Г. 121

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УСТАЛОСТНОГО НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ
Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Белоногов Н.С., Лобанов Д.С. 122

ON THE NUMERICAL SIMULATION OF THE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION INDUCED BY LASER ADDITIVE MANUFACTURING
Zinoviev A., Zinovieva O., Ploshikhin V., Romanova V.A., Balokhonov R.R. 123

МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ С ДЕФЕКТАМИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ
Наймарк О.Б. 124

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПРОБИВАНИИ ПРЕГРАД
Билалов Д.А., Соковиков М.А., Баяндин Ю.В., Чудинов В.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. 125

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ГИДРОЭКСТРУЗИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ У8А
Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С. 126

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОРТОТРОПНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
Баяндин Ю.В., Пантелеев И.А., Житникова К.А., Наймарк О.Б. 127

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ЗАГОТОВОК ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА РЫЧАЖНОЙ РАДИАЛЬНО-КОВОЧНОЙ МАШИНЕ
Карамышев А.П., Некрасов И.И., Нестеренко А.В., Паршин В.С., Смирнов С.В., Федулов А.А., Швейкин В.П. 128

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОБИВАНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДЫ
Мехоношина Т.Г., Соковиков М.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. 129

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАВНОВЕСИЯ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ ПРОСТРАНСТВА. МЯГКОЕ И ЖЕСТКОЕ НАГРУЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ
Бердников К.В., Стружанов В.В. 130

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СЛОИСТОЙ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛЫ КОРИОЛИСА И ТЕПЛООБМЕНЕ ПО ЗАКОНУ НЬЮТОНА
Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю. 131

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ПЛОСКОЙ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ В ВИДЕ РАЗЛОЖЕНИЯ РЯДОВ ПО МАЛОМУ ПАРАМЕТРУ
Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю. 132

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ НА РЕАЛИЗАЦИЮ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАКРИТИЧЕСКОЙ СТАДИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ
Третьяков М.П., Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В. 133

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ С УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ И НАНО–СТРУКТУРОЙ В ПУЧКЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ
Крылова Т.А., Полетика И.М., Перовская М.В. 134

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФРАГМЕНТАЦИИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ
Ляпунова Е.А., Давыдова М.М., Зайцев Д.В., Панфилов П.Е. 135

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ ЭП679 НА ПЛАСТОМЕТРИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ
Гладковский С.В., Потапов А.И., Двойников Д.А., Лепихин С.В., Салихянов Д.Р. 136

ПРИБОРЫ И МЕТОД КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ
Корх М.К., Ригмант М.Б., Ничипурук А.П. 137

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА НА АТОМНОМ УРОВНЕ ПРИ ЕГО НАГРУЖЕНИИ ПО СХЕМЕ ИМИТИРУЮЩЕЙ СВАРКУ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВИБРАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ
Коноваленко Ив.С., Коноваленко Иг.С., Дмитриев А.И., Псахье С.Г., Колубаев Е.А. 138

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ, ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, ВЫНОСЛИВОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ
Вольнов К.М., Егоров Д.Ю. 139

РАЗНОВИДНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ, ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, ВЫНОСЛИВОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ
Вольнов К.М., Егоров Д.Ю. 140

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПРОКАТА В ПОТОКЕ ТРУБОПРКАТНОГО АГРЕГАТА
Швейкин В.П., Смирнов С.В., Нестеренко А.В. 141

ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ КОМПОЗИЦИОННЫМ КОНСТРУИРОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ
Бледнова Ж.М., Русинов П.О. 142

SOFTWARE FOR SEGMENTATION, STATISTICAL ANALYSIS AND MODELING OF SURFACE ORDERED STRUCTURES
Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A., Hats Yu.I., Menou A., Panin S.V. 143

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛОС ИЗ СТАЛИ И АЛЮМИНИЯ НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ
Лехов О.С., Билалов Д.Х. 144

ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ
Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Нестеренко А.В. 145

SIZE-DEPENDENT STRENGTHENING OF PARTICLE-REINFORCED COMPOSITES SIMULATED BY A COUPLED THERMO-MECHANICAL MODEL
Zhu B., Lei M.K. 146

MICROSTRUCTURE DEPENDENCE OF MECHANIC BEHAVIOR OF AN ALLOY 690
Pan X.M., Zhu X.P., Zhang Y.Y., Lei M.K. 147

EFFECT OF η--PHASE PRECIPITATES ON DEFORMATION NANOSTRUCTURING AND HARDNESS OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOY
Krymskiy S.V., Sitdikov O.Sh., Markushev M.V. 148

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЙ-ГРАФЕНОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
Елшина Л.А., Мурадымов Р.В., Вичужанин Д.И., Смирнова Е.О. 149

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НЕЙТРОНОЗАЩИТНЫЕ ЛИСТОВЫЕ Al/B4C-КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
Гладковский С.В., Каманцев И.С., Кутенева С.В., Веселова В.Е., Казеев В.Г., Суворов Е.А. 150

ВЫБОР ХИРУРГИЧЕСКОЙ ТАКТИКИ ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДНЕЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПЛЕЧЕВОГО СУСТАВА У ПАЦИЕНТОВ С ВЫСОКОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ
Чертков А.К., Обухов И.А., Баженов А.В., Панченко Е.Н., Рошаль С.М. 151

ОТДАЛЕННЫЕ (15-ЛЕТНИЕ) РЕЗУЛЬТАТЫ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИЯ ПОЯСНИЧНЫХ ДИСКОВ ДИНАМИЧЕСКИМИ И РИГИДНЫМИ КОНСТРУКЦЯМИ
Чертков А.К., Чертков К.А., Баженов А.В. 152

РОЛЬ ТКАНЕВОЙ ОКСИМЕТРИИ И ЦИФРОВОЙ ДИНАМОМЕТРИИ В ПРОФИЛАКТИКЕ РАЗВИТИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МЕЖОСТИСТЫХ ФИКСАТОРОВ
Чертков К.А., Кутепов С.М., Чертков А.К., Баженов А.В. 153

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РИГИДНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ФИКСАТОРОВ У ПАЦИЕНТОВ С ДЕГЕНЕРАТИВНЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ ПОЗВОНОЧНИКА
Чертков А.К., Баженов А.В., Чертков К.А. 154

ИЕРАРХИЧЕСКИ СТРУКТУРИРОВАННЫЙ ГРАФЕН-НАНОАЛМАЗНЫЙ КОМПОЗИТ
Елшина Л.А., Мурадымов Р.В., Елшина В.А., Вовкотруб Э.Г., Шатунова А.А., Пряхина В.И., Пелегов Д.В., Шур В.Я. 155

СИНТЕЗ НОВЫХ ЦИНК-ГРАФЕНОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
Елшина Л.А., Елшина В.А., Шатунова А.А. 156

A MAGNETIC METHOD FOR DETECTING PLASTIC STRAIN LOCALIZATION ZONES
Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Kuzevanov V.F., Dimitrov R. 157

MAGNETIC TECHNIQUE FOR DETECTING DISCONTINUITIES IN PRODUCTS MADE OF NON-FERROMAGNETIC MATERIALS
Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Kuzevanov V.F., Dimitrov R. 158

МАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛИ 15ХН4Д В УСЛОВИЯХ УПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
Горкунов Э.С., Якушенко Е.И., Задворкин С.М., Мушников А.Н. 159

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА РАЗЛИЧНЫХ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АУСТЕНИТНОЙ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ
Путилова Е.А., Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Мушникова С.Ю. 160

ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
Путилова Е.А., Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С., Чернядьева Е.А. 161

АНОМАЛЬНЫЙ РОСТ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ РАЗНЫХ ВИДАХ ПЕРЕГРУЗОК: СРАВНЕНИЕ ФРАКТОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
Сундер Р., Биаков А., Еремин А., Панин С. 162

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ Ti-Nb СЛОЕВ
Поляков И.А., Самойленко В.В., Чучкова Л.В. 163

ЗАО «ЛАБЦЕНТР» – АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
Пучков А. В. 164

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ ИЗБЫТОЧНОЙ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ
Худорожкова Ю.В., Буров С.В. 165

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ РЕФЛЕКТОРОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
Москвичев В.В., Доронин С.В. 166

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОВРЕЖДЕННОСТЬ ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ГИДРОЭКСТРУЗИИ
Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Вичужанин Д.И., Горулева Л.С. 167

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В СТАЛЯХ СО СТАБИЛЬНЫМ И МЕТАСТАБИЛЬНЫМ АУСТЕНИТОМ ПРИ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ
Худорожкова Ю.В., Каманцев И.С., Буров С.В. 168

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА
Гоголева О.В., Петрова П.Н., Попов С.Н. 169

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ В ДИАГНОСТИКЕ РАКА ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ
Лях В.Д., Гагиев В.В., Смирнов А.С. 170

ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РЕМОНТНИХ РАБОТАХ И В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА
Бутаков С.В., Полянский С.Н., Каржавин В.В., Сенив В.М. 171

CLEANING TOOL SURFACES DURING REPAIRMENT AND PRODUCTION PROCESS
Butakov S.V., Polyanskii S.N., Karzhavin V.V., Seniv V.M. 172

ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОНА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ
Калашников В.И., Москвин Р.Н., Белякова Е.А. 173

USING OF COCNRETE OF NEW GENERATION IN MECHANICAL ENGINEERING
Kalashnikov V., Moskvin R., Belyakova E. 174

УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ БИОБАЗИРОВАННОГО ПОЛИАМИДА 1010, НАПОЛНЕННЫХ РУБЛЕНЫМИ ВОЛОКНАМИ
Никифоров А.А., Охотина Н.А., Вольфсон С.И., Ринберг Р., Кролл Л. 175

STRESS-STRAIN PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON BIO-BASED POLYAMIDE 1010 REINFORCED WITH CUT FIBERS
Nikiforov A.A., Okhotina N.A., Volfson S.I.,Rinberg R., Kroll L. 176

КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА И МОДИФИЦИРОВАННОГО ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ
Файзуллин И.З., Вольфсон С.И., Мусин И.Н., Филиппов А.С., Файзуллин А.З. 177

COMPOSITION BASED ON POLYPROPYLENE AND MODIFIED WOOD FILLER
Fayzullin I.Z., Volfson S.I., Musin I.N., Filippov A.S., Fayzullin A.Z. 178

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СИЛУМИНА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ
Аксёнова К.В., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. 179

ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТЬ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛОВ: РАЗЛОЖЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ, МЕРА ДЕФОРМАЦИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ
Трусов П.В., Швейкин А.И. 181

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АНОМАЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В СЛОИСТО- БЛОКОВОЙ СРЕДЕ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
Хачай О.А., Хачай А.Ю. 183

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
Тарасов А.Г., Семухин Б.С. 185

СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТИМУЛИРОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
Гагарин А.Ю., Сарычев В.Д., Романов Д.А., Коновалов С.В., Громов В.Е. 187

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЗОДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЯ
Реков А.М. 189

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА
Карпов В.В., Семенов А.А. 191

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ЛЭМБА
Толипов Х.Б. 193

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ
Шилько Е.В., Астафуров С.В., Григорьев А.С., Овчаренко В.Е., Yu Bao Hai, Xiong Tianying, Псахье С.Г. 196

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В БИМЕТАЛЛЕ СТ.3+Х18Н8 НА МАКРОМАСШТАБНОМ УРОВНЕ
Ли Ю.В., Баранникова С.А., Бочкарева А.В., Лунев А.Г., Шляхова Г.В., Зуев Л.Б. 198

ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ МИКРОСТРУКТУРНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ
Волков С.С., Волкова Т.А. 200

VIBRATIONS OF SHELLS WITH DYNAMICAL ASYMMETRY
Seregin S.V. 202

ПОВЫШЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО ПЕРИОДА ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ
Каржавин В.В., Сенив В.М., Соколов А.В., Шлеенков А.С. 204

IMPROVING THE OVERHAUL PERIOD OF SUCKER ROD PUMPS
Karzhavin V.V., Seniv V.M., Sokolov A.V., Shleenkov A.S. 206

ПОЛНОЕ АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ М. УИЛЬЯМСА У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД, ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
Степанова Л.В., Росляков П.С. 208

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ГРАДИЕНТНЫХ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЯХ
Пугачева Н.Б., Быкова Т.М 210

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ
Кирпичёв В.А., Сазанов В.П., Вакулюк В.С., Шадрин В.К. 212

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ДЕТАЛЕЙ
Павлов В.Ф., Семёнова О.Ю., Вакулюк В.С., Сазанов В.П. 214

ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФРАГМЕНТАЦИИ И ДРОБЛЕНИЯ ЗЕРЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ
Волегов П.С., Тельканов М.А. 216

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ
Тверяков А.М., Штин А.С. 218

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ПРОЦЕССАХ ОМД
Баранов Г.Л. 220

ВИХРЕТОКОВАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ СПЛАВОВ
Дмитриев С.Ф., Маликов В.Н., Сагалаков А.М., Давыдченко М.А., Ишков А.В. 222

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЗЕРНОГРАНИЧНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ
Озерных В.С., Волегов П.С. 224

КОНТАКТНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СОПРЯЖЕНИЯХ КОНУСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРЕДЕЛАХ ТРЕНИЯ ПОКОЯ
Феропонтов В.А., Перфильева Н.В., Максименко А.А., Котенева Н.В. 226

КОНТАКТНАЯ ЖЕСТКОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
Котенева Н.В., Максименко А.А., Перфильева Н.В., Феропонтов В.А., Борисова А.Д. 228

АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ
Коробов Ю.С., Белоцерковский М.А., Тимофеев К.М., Thomas S. 230

ВЛИЯНИЕ МОЛИБДЕНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА
Корешкова Е.В., Кулемина А.А. 232

ВЗАИМОСВЯЗЬ СУБШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ЗЕРНИСТОСТЬЮ МАТЕРИАЛА МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ И КАЧЕСТВОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. 234

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ РАСТРУБНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ТРУБ
Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Герасимов А.И. 236

ПОЛИМОРФНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ ЖЕЛЕЗОМ И СПЛАВОМ FE-NI
Жихарева И.Г., Шмидт В.В., Смирнова Н.В., Воробьев О.А. 238

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕЙКИ И РАДИУСА ВОЛОКОН АРМИРОВАНИЯ НА ТЕКСТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА
Шибаев В.А., Берестова С.А., Митюшов Е.А. 240

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАКРЫТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ
Еремин А.В., Панин С.В., Сундер Р. 242

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ ВОЛН ЛЭМБА
Еремин А.В., Панин С.В., Бяков А. В., Сундер Р. 244

МОНОФАЗНЫЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ СИСТЕМЫ Cu-Sn С КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ
Макрушина А.Н., Макаров С.В., Плотников В.А. 246

РАЗВИТИЕ ЦКП «ПЛАСТОМЕТРИЯ» ИМАШ УрО РАН В РАМКАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С НАУКОЙ И ПРОИЗВОДСТВОМ
Смирнов С.В., Гладковский С.В., Акилова И.Б. 248

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНО-МЕХАНО-ТЕРМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ
Макаров А.В. 250

ОПИСАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В РАМКАХ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ
Чечулина Е.А. 252

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СТРУКТУРУ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ
Шадринов Н.В., Соколова М.Д. 254

ОПЫТ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СТАЛЬНОГО СОСУДА ПОД ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ
Кулак С.М., Новиков В.Ф., Баранов А.В. 256

СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВЫХ ПОКРЫТИЙ «КАРБИД ТИТАНА – МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СВЯЗКА» С ДВУХУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРОЙ
Прибытков Г.А., Криницын М.Г., Барановский А.В., Коржова В.В., Коростелева Е.Н., Дураков В.Г. 258

ПОДОГРЕВ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
Старостин Н.П., Васильева М.А. 260

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ВСТЫК ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
Аммосова О.А., Старостин Н.П. 262

ПОЛЗУЧЕСТЬ И РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ПРИ ЕГО ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ДВУМЯ ЦИЛИНДРАМИ
Ковтанюк Л.В., Панченко Г.Л. 264

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В МАТЕРИАЛАХ СО СТЕПЕННЫМ ОПРЕДЕЛЯЮЩИМ ЗАКОНОМ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ: АСИМПТОТИЧЕСКИЙ ПОДХОД И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ НА СОБСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ
Степанова Л.В. 266

ИНФРАКРАСНОЕ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БИОИНЕРТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ
Шаркеев Ю.П., Вавилов В.П., Скрипняк В.А., Белявская О.А., Козулин А.А., Чулков А.О., Сороколетов А.Ю., Скрипняк В.В. 268

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И УПРОЧНЕНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ
Макаров А.В., Скорынина П.А., Юровских А.С., Осинцева А.Л. 270

ДВУХУРОВНЕВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ БОЛЬШИХ ГРАДИЕНТОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
Янц А.Ю., Трусов П.В. 272

ТРЕНИЕ И ИЗНОС МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ, СОДЕРЖАЩИХ СИЛИКОНОВОЕ МАСЛО
Федоров А.Л., Петрова П.Н., Маркова М.А. 274

ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ КОРРОЗИОННОГО ПРОЦЕССА В РАЗЛИЧНЫХ АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ ПО ПОКАЗАНИЯМ РЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ КОРРОЗИИ
Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Устинов В.П. 276

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ДИСКРЕТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
Попков А.А. 278

НЕОБРАТИМЫЕ И КВАЗИОБРАТИМЫЕ МАГНИТОУПРУГИЕ ЯВЛЕНИЯ В ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ
Новиков В.Ф., Муратов К.Р., Нерадовский Д.Ф. 280

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПЛЁНОК С ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ
Кудюков Е.В., Балымов К.Г., Лепаловский В.Н., Васьковский В.О. 282

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ ПРУТКОВОГО ПРОКАТА
Муравьева О.В., Муравьев В.В., Габбасова М.А., Петров К.В., Зорин В.А. 284

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ ДВУХФАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ СПЛОШНЫМИ И ПОЛЫМИ АНИЗОТРОПНЫМИ ВОЛОКНАМИ ИЛИ СФЕРИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ
Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А. 286

ОЦЕНКА НАЧАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МОНОЛИТНОЙ КРЕПИ СФЕРИЧЕСКОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ В МАССИВЕ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД
Зайцев А.В., Фукалов А.А. 288

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ, УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОМ, НА ОСНОВЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ
Шардаков И.Н., Быков А.А., Шестаков А.П., Глот И.О. 290

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ ЦИКЛА
Ильиных А.В. 292

МЕХАНИКА ТКАНЫХ КЕРАМО-КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С ЛОКАЛЬНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ
Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А. 294

СТАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРЫ, ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИТАХ
Зайцев А.В., Кокшаров В.С. 296

УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА И КОМПОЗИТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ
Зайцев А.В., Кокшаров В.С., Судаков И.А. 298

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКРИТИЧЕСКОЙ СТАДИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН
Темерова М.С., Вильдеман В.Э. 300

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРОЗОНДОВОГО МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТАДИЙНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ
Прохоров А.Е., Плехов О.А. 302

ОЦЕНКА КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОНЕНТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТКД
Терехина А.И., Плехов О.А. 304

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ
Желнин М.С., Изюмова А.Ю., Плехов О.А. 306

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ
Сулейманов Р.Н., Чекалкин А.А. 308

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ КЕРАМИКИ НА СТАТИСТИКУ ФРАГМЕНТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ
Банникова И.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. 310

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРРОЗИИ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ
Новиков В.Ф., Муратов К.Р., Тихонов К.В., Устинов В.П. 312

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ НАГРУЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОЦЕССОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ И ТЕМПЕРАТУР
Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В. 315

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ И ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ
Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. 317

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ
Соковиков М.А., Билалов Д.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. 319

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ВТМО
Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д. 321

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА УПЛОТНЕНИЕ НЕКОМПАКТНОГО ТИТАНОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ
Березин И.М., Нестеренко А.В., Залазинский А.Г. 323

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДИКИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПЛАНЕТАРНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ТИПА K-H-V И ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ НЕБОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ
Ражиков В.Н., Беляев А.Н. 325

СТРУКТУРА ЧАСТИЦ ДЕТОНАЦИОННОГО НАНОАЛМАЗА
Плотников В.А., Макаров С.В., Богданов Д.Г., Богданов А.С. 327

МАГНИТОУПРУГОЕ РАЗМАГНИЧИВАНИЕ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ
Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф. 330

СТУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОЭРРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ TiC-Mo, СФОРМИРОВАННОГО НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ
Романов Д.А., Гончарова Е.Н., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. 333

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С РАЗВИТОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ И НЕПРЯМОМ РАСТЯЖЕНИИ
Токтогулов Ш.Ж., Зайцев Д.В., Панфилов П.Е. 335

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
Сыч Т.В., Бехер С.А. 338

ПОЛУЧЕНИЕ ZrO2-ГРАФЕН НАНОКОМПОЗИТА МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ
Солис Н.В., Перетягин П.Ю., Селезнев А.Е., Торресильяс Р. 340

THE CALCULATOR TO DETERMINE THE POWER-ENERGY PARAMETERS OF METAL EXTRUSION
Shishin N.N., Babailov N.A. 342

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕОДНОРОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОУПРУГОГО СЛОЯ
Ватульян А.О., Нестеров С.А. 343

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ЗУБА ЧЕЛОВЕКА ПОСЛЕ РЕСТАВРАЦИИ
Забродина А.А., Спивак Н.М., Григорьев С.С., Зайцев Д.В. 344

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ДВУМЕРНЫХ КВАЗИЕРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР
Стволова С.С., Зубко И.Ю. 345

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОВОЛОКОННЫХ ЛАМИНАТОВ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ МЕТОДОМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА
Обирин К.Д., Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. 346

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДИНАМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ НАГРУЖЕНИЯ
Ветошкин С.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. 348

СВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СО СТРУКТУРОЙ И ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ ЖАРОПРОЧНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
Огнева М.С., Ригмант М.Б., Корх М.К., Корх Ю.В. 349

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1 С КВАДРАТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОР С ПОРОЙ В ЦЕНТРЕ
Воронин С.В., Лобода П.С., Ледяев М.Е. 350

СТЕПЕНЬ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ
Подкина Н.С., Кузнецова Е.В. 351

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ДАННЫХ В ПРОЦЕДУРАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ
Частоедов В.А., Кондратьев Н.С. 352

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
Кузнецова Е.В., Колмогоров Г.Л. 353

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ СТАЛИ У8А ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ГИДРОЭКСТРУЗИИ
Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С., Макаров А.В., Печеркина Н.Л., Черемицина Э.Р. 354

ВЛИЯНИЕ ТРЕУГОЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛАНА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1
Воронин С.В., Лобода П.С., Ледяев М.Е. 355

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Li МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ
Смирнова Е.О., Смирнов С.В., Пугачева Н.Б. 356

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВДАВЛИВАНИЯ ИНДЕНТОРА В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ
Кузнецов А.В., Саврай Р.А. 357

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ
Демидов С.А., Левина А.В., Вахонина К.Д., Шестопалов Ю.А., Шарапова В.А. 358

РЕЛАКСАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПРУЖИННОЙ ЛЕНТЫ ИЗ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ
Вахонина К.Д., Ягудин Г.А., Левина А.В., Озерец Н.Н. 359

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ТАКТИЧЕСКИХ ОПЕРАТИВНО-СОВЕТУЮЩИХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
Бурсук В.И., Васильев С.Н., Галяев А.А., Горкунов Э.С., Гурьев Ю.В., Задворкин С.М., Морозов Н.Ю., Якушенко Е.И. 360

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ
Зезин Ю.П. 361

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ/РАЗРУШЕНИЯ И ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИОНЫХ МАТЕРИАЛОВ
Панин С.В., Любутин П.С., Титков В.В., Чемезов В.О., Бяков А.В., Бурков М.В., Еремин А.В., Поляков И.Ю. 362

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ 363

Научное издание

Международная конференция
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»
сборник материалов (Екатеринбург, 16-20 мая 2016 г.)

Рекомендовано к изданию Ученым советом ИМАШ УрО РАН

Ответственный за выпуск Худорожкова Ю.В.
Компьютерная верстка Фатыхова Е.В.

ISBN 978-5-7691-2439-6

Подписано в печать 06.05.2016. Формат 60x84 1/16
Бумага писчая. Печать на ризографе. 40,00 п.л.
Тираж 500 экз. Заказ

Оригинал-макет изготовлен в
Отделе содействия научным исследованиям 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