

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  
11-15 декабря

Федеральное агентство научных организаций  
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

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

Сборник материалов

(Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г.)

Екатеринбург  
ИМАШ УрО РАН  
2017

УДК 620.17+620.16:620.18+620.19:620.179

ББК 34

Оргкомитет:

**Сопредседатели оргкомитета:**

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

**Члены оргкомитета:**

Батаев А.А. *Новосибирск, Россия*

Беляев А.К. *Санкт-Петербург, Россия*

Богданович А.В. *Минск, Беларусь*

Брезинова Ж. *Кошице, Словакия*

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

Вухерер Т. *Марибор, Словения*

Головин С.В. *Новосибирск, Россия*

Горячева И.Г. *Москва, Россия*

Гутманас Э. *Хайфа, Израиль*

Дегтярь В.Г. *Миасс, Россия*

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

Иршик Х. *Линц, Австрия*

Ломакин Е.В. *Москва, Россия*

Марущак П.О. *Тернополь, Украина*

Матвеев В.П. *Пермь, Россия*

Мену А. *Касабланка, Марокко*

Миховски М. *София, Болгария*

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

Муллюков Р.Р. *Уфа, Россия*

Прентковскис О. *Вильнюс, Литва*

Псахье С.Г. *Томск, Россия*

Смирнов С.В. *Екатеринбург, Россия*

Фомин В.М. *Новосибирск, Россия*

Ченцов А.Г. *Екатеринбург, Россия*

Шиплюк А.Н. *Новосибирск, Россия*

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

Программный комитет:

**Председатель:** Смирнов С.В. *Екатеринбург*

**Члены программного комитета:**

Буров С.В. *Екатеринбург*

Гладковский С.В. *Екатеринбург*

Дементьев В.Б. *Ижевск*

Коновалов А.В. *Екатеринбург*

Макаров А.В. *Екатеринбург*

Митюшов Е.А. *Екатеринбург*

Москвичев В.В. *Красноярск*

Наймарк О.Б. *Пермь*

Панин С.В. *Томск*

Плехов О.А. *Пермь*

Пугачева Н.Б. *Екатеринбург*

Радченко В.П. *Самара*

Ринкевич А.Б. *Екатеринбург*

Трусов П.В. *Пермь*

Худорожкова Ю.В. *Екатеринбург*

Швейкин В.П. *Екатеринбург*

XI Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г. : сб. материалов. – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2017. – 133 с. – ISBN 978-5-7691-2492-1.

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

ISBN 978-5-7691-2492-1



9 785769 124921

© ИМАШ УрО РАН, 2017

## ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ В РЕЛЬСАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Громов В.Е.<sup>1</sup>, Иванов Ю.Ф.<sup>2,3</sup>, Юрьев А.Б.<sup>4</sup>, Перегудов О.А.<sup>1</sup>,  
Морозов К.В.<sup>4</sup>, Коновалов С.В.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет,  
654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42, e-mail: [gromov@physics.sibsiu.ru](mailto:gromov@physics.sibsiu.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: [yufi55@mail.ru](mailto:yufi55@mail.ru)

<sup>3</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>4</sup>ООО «Евраз – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»,  
654042, Новокузнецк, ш. Космическое, 19, e-mail: [Vadim.Kosterev@evraz.com](mailto:Vadim.Kosterev@evraz.com); [morozovkv75@mail.ru](mailto:morozovkv75@mail.ru)

<sup>5</sup>Самарский Национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,  
Самара, Россия, e-mail: [ksv@ssau.ru](mailto:ksv@ssau.ru)

Увеличение интенсивности железнодорожного движения и его грузонапряженности вызывает необходимость дальнейшего повышения эксплуатационной стойкости рельсов. Проблема формирования и эволюции структуры и свойств рельсов при длительной эксплуатации представляет сложный комплекс взаимосвязанных научных и технических вопросов. Учитывая, что кинетика процессов формирования структурно-фазовых состояний связана с основами теории прочности и пластичности, представляется исключительно важной информация о параметрах тонкой структуры рельсов в разных сечениях.

Работа направлена на выявление закономерностей эволюции структуры, фазового состава и дефектной субструктуры, формирующихся на различных расстояниях по центральной оси и по выкружке в головке рельсов после различных сроков эксплуатации.

В качестве материала исследования использовали рельсы Р65 производства Кузнецкого металлургического комбината (ныне «Евраз – ЗСМК»). Образцы рельсов были вырезаны из изделий в исходном состоянии и после эксплуатации на Свердловской железной дороге. После пропущенного тоннажа 1000 млн брутто-тонн рельсы были изъяты по боковому износу.

Исследования были проведены методами современного физического материаловедения.

После пропущенного тоннажа 1000 млн тонн брутто по центральной оси головки рельсов выявлено:

- снижение износостойкости (в  $\approx 3,4$  раза), коэффициента трения (в  $\approx 1,15$  раза) и микротвердости (в  $\approx 1,5$  раза) в слое до 2 мм;
- формирование в процессе эксплуатации поверхностного слоя толщиной до 40 мкм, содержащего большое количество микропор и микротрещин;
- формирование градиентной субструктуры, характеризующейся полным разрушением колоний пластинчатого перлита (поверхностный слой); протеканием начальной стадии динамической рекристаллизации зерен структурно свободного феррита (слой толщиной не менее 2 мм); фрагментацией зерен феррито-карбидной смеси с образованием структуры, в которой частицы карбидной фазы расположены преимущественно по границам субзерен (слой толщиной не менее 2 мм).

Анализ исследований структурно-фазовых состояний и свойств «рабочей» выкружки рельсов, сформированных после пропущенного тоннажа 1000 млн тонн брутто, позволил выявить:

- существенное (в 1,5–2 раза) увеличение микротвердости поверхностного слоя толщиной до  $\approx 10$  мм;
- несплошности, проходящие под некоторым углом к поверхности «рабочей» выкружки на глубину до 500 мкм;
- факты, указывающие на протекание в поверхностном слое толщиной не менее 2 мм при эксплуатации рельсов двух взаимодополняющих процессов преобразования карбидной фазы стали: (1) процесса разрезания частиц цементита с последующим выносом их в объем ферритных зерен или пластин (в структуре перлита); (2) процесса разрезания, последующего растворения частиц цементита, перехода атомов углерода на дислокации (в атмосферы Коттрелла и в ядра дислокаций), перенос атомов углерода дислокациями в объем зерен (или пластин) феррита с последующим повторным формированием наноразмерных частиц цементита;
- факты, свидетельствующие о протекании в поверхностном слое (слое толщиной не менее 2 мм) «рабочей» выкружки при эксплуатации рельсов процесса динамической рекристаллизации;
- увеличение в 1,3–1,5 раза скалярной и избыточной плотности дислокаций.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 15-12-00010.*

# ГИБРИДНЫЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПРЕССОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Крючков Д.И., Залазинский А.Г.

ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН,  
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия,  
e-mail: [kru4koff@bk.ru](mailto:kru4koff@bk.ru)

Представлен гибридный моделирующий комплекс для реализации экспериментально-расчетного метода инженерного анализа и оптимизации процессов пластического деформирования неоднородных материалов в целях совершенствования технологий и машин обработки металлов давлением. Комплекс интегрирует достижения конечно-элементного моделирования, элементы искусственного интеллекта, математической обработки данных. При разработке программного обеспечения в ходе тестирования решена задача инженерного анализа и оптимизации по критерию обеспечения минимальной поврежденности деформируемого материала для процесса прессования через ступенчатую матрицу титанового прутка марки ВТ1-0 в медной оболочке марки М1.

Одним из направлений развития комплекса является внедрение средств поддержки принятия решений в области совершенствования технологических процессов получения композитных полуфабрикатов и изделий из титаносодержащего сырья. Для его реализации разрабатываются и внедряются в математическую подсистему подпрограммы обработки расчетных и экспериментальных данных методами оптимизации и хранения результатов обработки в базе знаний.

Предлагаемый метод решения предусматривает интеграцию подпрограмм математической обработки данных с САЕ-системой Abaqus, разработку программных модулей и управляющей подсистемы с использованием языка высокого уровня программирования Python. Преимущество такого подхода заключается в том, что расширяются возможности анализа процессов и повышается точность проектных решений, появляется возможность параметрического моделирования сложных технологических процессов. Эффективность разработанного гибридного комплекса в сравнении с существующими подходами к моделированию и оптимизации технологических процессов заключается в снижении трудоемкости процесса моделирования, например, автоматизации процесса создания эскизов, задании граничных условий, проведении расчета и накопления данных. Это позволяет значительно экономить время, а также сокращает влияние случайной ошибки при обработке данных. Наряду с автоматизацией вычислений пользователь может вмешиваться в ход решения, изменять регрессионную модель, добавлять ограничения, расширять или сужать область значений для экстраполяции данных.

Решена задача определения зависимости усилия, действующего на пуансон, и поврежденности компонентов биметаллического прутка от толщины оболочки коэффициента трения заготовки о поверхность деформирующего инструмента. При этом критерий поврежденности компонентов биметаллического прутка принимается в качестве определяющего при оценке целесообразности реализации технологического процесса. Предполагается, что деформирование биметаллического прутка является нестационарным, изотермическим и осесимметричным процессом. Заготовка собрана из двух изотропных, но отличающихся по свойствам материалов. Первоначальное положение и границы компонентов биметалла заданы. Проведено пятнадцать вычислительных экспериментов. В программном комплексе выполнены необходимые расчеты с применением конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния компонентов биметаллической заготовки. В качестве входных параметров приняты: диаметр  $D$  и длина  $L$  выдавливаемой части заготовки 0,04 м и 0,03 м соответственно; диаметр отпрессованного изделия  $d = 0,02$  м; углы матрицы  $\alpha = \beta = 30^\circ$ .

Результаты моделирования хорошо согласуются с данными, полученными по аналитическим формулам для расчета верхней и нижней оценки удельного давления прессования. Минимальное значение поврежденности деформируемого материала  $\omega_{\min} = 0,3945$  соответствует области оптимальных значений варьируемых параметров  $S/D = 0,15 \dots 0,19$  и  $\psi = 0,11 \dots 0,14$ .

Иллюстрация работы программного комплекса показывает пригодность его использования в научных исследованиях, совершенствовании процессов обработки металлов давлением и в образовательных целях.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ АНИЗОТРОПНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Логинов Ю.Н., Пузанов М.П.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Россия,  
e-mail: [unl@mf.ustu.ru](mailto:unl@mf.ustu.ru)*

Моделирование процессов деформации с помощью метода конечных элементов нашло широкое применение в области обработки металлов давлением (ОМД). Решение краевой задачи при этом в большинстве случаев происходит с применением гипотезы изотропности деформируемой среды. Необходимо заметить, что принятие такой гипотезы может приводить к неточностям в расчётах, поскольку не учитывает особенности свойств деформируемых материалов. Учесть анизотропию деформируемой среды возможно используя соответствующее условие текучести. Анализ работ, представляющих результаты решения краевой задачи для таких процессов ОМД как прокатка, прессование, волочение, штамповка показал, что при моделировании применяется условие текучести Мизеса. Использование условия текучести для анизотропной среды может обеспечить повышение достоверности результатов моделирования. В данном случае перед моделированием сложных процессов ОМД необходимо выполнить проверку достоверности решения с использованием нового условия текучести в упрощённых условиях тестовой задачи.

Цель исследования заключается в оценке последствий замены гипотезы изотропности на гипотезу анизотропии при решении задачи осадки цилиндрической заготовки.

В работе выполнено моделирование деформации анизотропной пластической среды методом конечных элементов в программе DEFORM-3D. Задачу решали в упрощённом виде, чтобы оценить напрямую влияние анизотропии деформируемой среды на формоизменение. Схема процесса – осадка цилиндрической заготовки в холодном состоянии с минимально-возможным коэффициентом трения на контактных поверхностях ( $\mu = 0,0001$ ). В качестве материала заготовки назначили сплав с известными пластическими свойствами. Условие текучести задано моделью Хилла. Рассматривали три варианта соотношений коэффициентов анизотропии. В каждом варианте ось направления наибольшего сопротивления деформации материала поочередно располагалась вдоль трёх осей координат. В первых двух вариантах наибольшие прочностные свойства материала реализованы в поперечном сечении заготовки, в последнем варианте – в осевом направлении.

В результате решения краевой задачи получили распределение компонент тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  и степени деформации  $\epsilon_{ij}$ . Для вариантов задачи с расположением наибольшей прочностной характеристики в плоскости заготовки было обнаружено, что исходная круглая форма основания превратилась в овальную, причём меньшая ось овала направлена в сторону вектора наибольших прочностных свойств. Рассчитанный уровень деформации  $\epsilon_{rr}$  близок к нулю по меньшей оси овала, по длинной оси овала наоборот – наибольший. Максимальное значение  $\epsilon_{rr}$  около 0,45. Особенность третьего варианта задачи заключалась в том, что прочностные свойства в поперечном сечении заготовки одинаковы, а направление наибольших прочностных свойств принято параллельным её оси. В результате формоизменение заготовки в плане оказалось одинаковым и основание цилиндра после деформации осталось круглым. Степень деформации в поперечном сечении изменялась в сравнительно узких пределах от 0,24 до 0,27. Установлено различие в величине энергосиловых параметров деформации. Усилие деформации равно 573 кН в первых двух вариантах задачи и 1580 кН в третьем варианте, что существенно выше. Данное явление объясняется изменением величины главного напряжения  $\sigma_{zz}$  в зависимости от направления анизотропии прочностных свойств.

Выводы. Решение тестовой задачи осадки анизотропной среды методом конечных элементов показало, что использование условия текучести Хилла позволяет с высокой степенью достоверности описать формоизменение металла и напряжённо-деформированное состояние в очаге деформации.

## РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ПИКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК

Миронов В.И.<sup>1,2</sup>, Огорелков Д.А.<sup>2</sup>, Лукашук О.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения УрО РАН,

620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34 Россия,

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия,

e-mail: visim.vm@mail.ru, ogorelkov.dimon@yandex.ru, oldim96@mail.ru

Основу физической теории надежности машин составляют исследования деградиционных процессов различной природы в материале конструкций. Прежде всего, усталостные процессы, поскольку подавляющее число отказов связано именно с усталостным разрушением. Общее представление о причинах, природе и разновидностях усталости дают физические исследования этого явления. Но получаемые закономерности, как правило, невозможно использовать в прочностных расчетах машин, проводимых в категориях напряжений и деформаций. Применяемые в работе циклические функции сопротивления строятся в относительно простом механическом эксперименте. Эти функции определяют усталостный процесс как переход пластичного конструкционного материала в хрупкое состояние, что не противоречит физическим представлениям о природе усталости. Они хорошо согласуются с системой уравнений теории упругости, применяемой в расчетах на многоцикловую усталость.

В эксплуатации машины подвержены действию широкого спектра нагрузок нерегулярного характера. В этом случае повсеместно используется гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений в изначальном или скорректированном виде. Данная гипотеза формального, нефизического характера часто дает неприемлемый для практики прогноз долговечности. В методе функций сопротивления переход с одного уровня напряжений цикла на другой связывается с переходом с одной кинетической кривой на другую. В силовом подходе равенство текущего значения сопротивлений при разной истории нагружения принимается в качестве условия эквивалентности циклических состояний материала. Показано, что в данном подходе учитывается эффект взаимодействия напряжений разного уровня, наблюдаемый в эксперименте.

Модель циклической деградации материала апробирована в расчетах металлических конструкций ряда машин при блочном нагружении. Расчетная долговечность изделий оказалась ближе к данным эксплуатации, чем при линейном суммировании повреждений. В докладе рассматривается переходный случай нагружения, когда напряжения меняются от цикла к циклу, но по известному закону. Конкретно используется экспоненциальный закон свободных затухающих колебаний металлической конструкции при известном логарифмическом декременте.

Объектом исследования выбрана пролетная балка мостового крана, спроектированного по существующим нормам расчета на прочность и жесткость. Логарифмический декремент затухания колебаний таких конструкций по литературным данным составляет порядка 0,05–0,1. Показано, что при торможении механизма передвижения крана расчетные напряжения превышают предел выносливости. На основе преобразованного выражения для кинетической кривой, аппроксимированной показательной функцией, разработан алгоритм расчета долговечности пролетной балки. Сформирована рабочая программа на языке Python. Материалы различаются показателем степени кинетической кривой, который выбран в качестве параметра. Результаты расчета представлены в виде набора графиков, отражающих циклическую деградацию прочности материала в опасной точке конструкции. Для сравнения параллельно проведен расчет долговечности балки по линейной гипотезе при равных прочих условиях.

Установлено, что при пиковой перегрузке от торможения моста метод функций сопротивления дает консервативный прогноз долговечности балки по сравнению с линейным суммированием. Теоретически совпадение с линейным прогнозом возможно при бесконечно большом значении показателя степени кинетической кривой. То есть в том случае, когда свойства материала не меняются вплоть до образования усталостной трещины.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поволоцкая А.М.<sup>1</sup>, Логинов Ю.Н.<sup>2</sup>, Пузанов М.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская,  
г. Екатеринбург, 620049, Россия, e-mail: [us@imach.uran.ru](mailto:us@imach.uran.ru)

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Россия, e-mail: [unl@mf.ustu.ru](mailto:unl@mf.ustu.ru)

Цель исследования заключается в оценке последствий замены гипотезы изотропности на гипотезу анизотропии при решении краевой задачи теории пластичности для процесса осадки цилиндрической заготовки.

В настоящей работе выполнено решение краевой задачи для случая деформации анизотропной пластической среды с изотропным упрочнением. Решение выполнено методом конечных элементов. Задачу решали в максимально упрощённом виде, чтобы оценить прямую влияние анизотропии деформируемой среды на формоизменение. Процесс деформации выполнен в виде холодной осадки цилиндрической заготовки с минимально-возможным трением на контактных поверхностях, что обеспечило реализацию напряжённого состояния близкого к линейному. В качестве материала заготовки назначили кремнистую трансформаторную сталь (сплав вида Fe + 3 % Si) с известными пластическими свойствами.

Условие текучести для анизотропного материала было задано моделью Хилла. Было рассмотрено три варианта соотношений коэффициентов анизотропии. В каждом из вариантов ось направления наибольшего сопротивления деформации материала поочередно располагалась вдоль трех осей координат. Таким образом, в первых двух вариантах задачи наибольшие прочностные свойства материала реализованы в поперечном сечении заготовки, а в последнем варианте – в осевом направлении.

В результате решения краевой задачи получили распределение компонент тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  и степени деформации  $\epsilon_{ij}$ . Для вариантов задачи с расположением наибольшей прочностной характеристики в плоскости заготовки было обнаружено, что исходная круглая форма основания превратилась в овальную, причём меньшая ось овала направлена в сторону вектора наибольших прочностных свойств. Соотношение осей при этом близко к 1,5. Рассчитанный уровень деформации  $\epsilon_{rr}$  близок к нулю по меньшей оси овала, по длинной оси овала наоборот – наибольший. Максимальное значение  $\epsilon_{rr}$  около 0,45. Для компоненты тензора  $\epsilon_{\phi\phi}$  максимум и минимум поменялись местами. Алгебраическое сложение неоднородных картин распределения  $\epsilon_{rr}$  и  $\epsilon_{\phi\phi}$  даёт однородную картину распределения компоненты  $\epsilon_{zz}$ . Особенность третьего варианта задачи заключалась в том, что прочностные свойства в поперечном сечении заготовки одинаковы, а направление наибольших прочностных свойств принято параллельным её оси. В результате формоизменение заготовки в плане оказалось одинаковым и основание цилиндра после деформации осталось круглым. Степень деформации в поперечном сечении изменялась в сравнительно узких пределах от 0,24 до 0,27.

Установлено различие в величине энергосиловых параметров деформации. Усилие деформации равно 573 кН в первых двух вариантах задачи и 1580 кН в третьем варианте, что существенно выше. Данное явление объясняется изменением величины главного напряжения  $\sigma_{zz}$  в зависимости от направления анизотропии прочностных свойств.

Выводы. Решение краевой задачи осадки цилиндрической заготовки из анизотропного материала показало, что основание заготовки может принимать овальную форму при расположении осей с различными значениями напряжения пластического течения в плоскости этого основания. Меньшая ось овала при этом соответствует направлению наибольшего напряжения пластического течения. При расположении осей с различными значениями напряжения пластического течения в плоскости продольного сечения заготовки её форма остается цилиндрической, усилие деформации в данном случае выше.

# ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ КОНТАКТНОМ НАГРУЖЕНИИ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПГ–СР2–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ГАЗОПОРОШКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Саврай Р.А., Макаров А.В., Горкунов Э.С., Соболева Н.Н., Коган Л.Х.,  
Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л., Давыдова Н.А.

*Институт машиноведения УрО РАН,*

*д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия, e-mail: [ras@imach.uran.ru](mailto:ras@imach.uran.ru);*

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,*

*д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Россия;*

*Уральский Федеральный Университет, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Россия*

Хромоникелевые покрытия широко используются для создания на их основе композиционных покрытий при введении в состав порошков различных добавок, например, TiC, WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, SiC, TaC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, которые могут оказывать различное влияние на стойкость покрытий в условиях механического контактного воздействия. Поэтому актуальной задачей является исследование контактной выносливости композиционных покрытий и возможностей контроля их усталостной деградации. Наши исследования показали возможность применения вихретокового метода для контроля и оценки химического и фазового составов, твердости, износостойкости и контактной выносливости лазерных наплавки различного типа, а также для контроля накопленной деформации и трещинообразования при циклическом нагружении металлических материалов.

Целью настоящей работы – изучение возможностей вихретокового метода для контроля усталостной деградации при контактном нагружении полученного методом газопорошковой лазерной наплавки композиционного покрытия ПГ–СР2–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> с добавкой карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> в количестве 15 мас. %. Механические испытания на контактную усталость проводили по схеме пульсирующего неударного контакта шар–плоскость на базе  $N = 10^6$  циклов нагружения. Измерения электромагнитных параметров полученного лазерной наплавкой композиционного покрытия выполняли на лабораторном макете вихретокового прибора с использованием дифференциально включенного накладного трансформаторного преобразователя с ферритовым сердечником броневго типа на частотах  $f = 36, 72; 96$  и  $120$  кГц.

Установлены возможности контроля вихретоковым методом усталостной деградации при контактном нагружении композиционного покрытия ПГ–СР2–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> с добавкой карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> в количестве 15 мас. %, полученного методом газопорошковой лазерной наплавки. Показано, что для композиционного покрытия ПГ–СР2–15 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> контроль вихретоковым методом усталостной деградации при контактном нагружении может проводиться измерениями показаний вихретокового прибора на больших частотах возбуждения вихретокового преобразователя  $f = 72–120$  кГц. В этом случае степень влияния ферромагнитной стальной основы на показания вихретокового прибора б минимальна и в большей степени анализируется тонкий поверхностный слой, в котором и развиваются процессы усталостной деградации покрытия. При этом зависимости показаний вихретокового прибора имеют нисходящую и восходящую ветви, граница между которыми при данных условиях нагружения составила  $3 \times 10^5$  циклов. Это обусловлено влиянием, с одной стороны, трещинообразования, а с другой – когезионного разрушения и уплотнения покрытия, оказывающих противоположное влияние на величину удельного электросопротивления и, соответственно, на показания вихретокового прибора. Отметим, что показания вихретоковых преобразователей при одинаковых условиях измерений и слабых полях возбуждения определяются только значениями магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления материала. По нисходящей ветви можно контролировать процесс образования и роста трещин, по восходящей ветви можно контролировать степень когезионного разрушения. Однако при разработке методики контроля необходимо учитывать, что одним показаниям вихретокового прибора может соответствовать разная степень усталостной деградации покрытия.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 01201375904 и ФАНО России по темам № 01201463331 и № 01201463329.*

## УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Волков С.С.<sup>а)</sup>, Стружанов В.В.<sup>б)</sup>

*Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620219, Россия,*

<sup>а)</sup>*e-mail: [volkovss48@yandex.ru](mailto:volkovss48@yandex.ru), <sup>б)</sup>[stru@imach.uran.ru](mailto:stru@imach.uran.ru)*

Характерной особенностью усталостного разрушения материалов является значительный разброс долговечности, т. е. числа циклов до разрушения, при работе одинаковых деталей в похожих условиях эксплуатации. Одной из причин этого является случайность нагрузок, действующих на детали механизмов. Рассмотрим влияние случайных напряжений для прогнозирования долговечности материалов при циклическом нагружении. Основной характеристикой выносливости детали является кривая усталости Велера. Уравнение линии усталости запишем в виде:

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_r}\right)^\alpha = \frac{N_0}{N}, \quad \sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}).$$

Здесь  $\sigma_a$  – амплитуда (напряжение) цикла;  $N$  – число циклов до разрушения (долговечность) детали при данной амплитуде цикла;  $\sigma_r$  – предел выносливости при коэффициенте асимметрии цикла  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ ;  $N_0$  – число циклов, соответствующее пределу выносливости. Показатель степени  $\sigma$  зависит от свойств материала и условий эксперимента.

Рассмотрим логарифм долговечности  $\lg N = Y$  как функцию случайной амплитуды,  $\sigma_a = X$ . Значения случайных величин  $X$  и  $Y$  обозначим  $x$  и  $y$  соответственно. Тогда получим

$$y = \varphi(x) = \lg N_0 + \sigma \lg \sigma_r - \sigma \lg x.$$

Запишем обратную функцию  $x = \psi(y)$  и вычислим ее производную  $\psi'(y)$ .

$$x = \psi(y) = \sigma_r \cdot \exp\left(\frac{-y + \lg N_0}{\alpha \lg e}\right).$$

В результате найдем плотность  $g(y)$  и функцию распределения  $G(y)$  логарифма случайной долговечности  $Y$  через плотность  $f(x)$  и функцию распределения  $F(x)$  случайного напряжения  $X$ :

$$g(y) = f(\psi(y)) |\psi'(y)|; \quad G(y) = F(\psi(y)).$$

При выборе плотности распределения вероятностей случайной амплитуды нагружения используются соответствующие экспериментальные гистограммы. Соответствие закона распределения и гистограммы проверяется по статистическим критериям согласия. По данным эксперимента определяется математическое ожидание  $m$  и среднее квадратичное отклонение  $s$  случайной амплитуды.

Рассматривается числовой пример. Проведена статистическая обработка опытных данных о случайных напряжениях,  $\sigma_a$  на диапазоне от 100 МПа до 400 МПа. Построена гистограмма относительных частот напряжений и найдены два варианта ее приближения в виде распределения Релея и нормального распределения. Рассчитана вероятность долговечности  $N$  на нескольких интервалах в диапазоне  $(10^5; 10^8)$ . Результаты расчетов приведены в таблице.

Интервалы для $\lg N$	(5; 5,5)	(5,5; 6)	(6; 6,5)	(6,5; 7)	(7; 7,5)	(7,5; 8)
Нормальное распределение	0,001	0,091	0,246	0,283	0,204	0,175
Распределение Релея	0,019	0,090	0,198	0,272	0,239	0,183

Вероятность попадания случайной долговечности  $N$  в диапазон  $(N_1, N_2)$  вычисляется с помощью функции распределения  $G(y)$ :  $P(N_1 \leq N \leq N_2) = G(\lg N_2) - G(\lg N_1)$ .

Приведенные результаты показывают существенное влияние вида распределения на оценку вероятности усталостной долговечности. Следовательно, прогнозирование долговечности в ответственных случаях должно опираться на достаточно большой массив статистических данных.

Разработана вероятностная математическая модель оценки долговечности. Это дает возможность отразить реальные процессы усталостного разрушения материалов с учетом случайных условий нагружения. Учитывается влияние случайной амплитуды цикла и вида ее распределения на законы распределения случайной долговечности. Это дает возможность уточнить существующие методы прогнозирования усталостной долговечности.

#### Литература

1. Серенсен С. В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. М.: Атомиздат, 1975. 192 с.
2. Котельников А. П. Специальные средства предупреждения техногенных катастроф, вызванных усталостным разрушением металлоконструкций машин, выработавших нормативный срок службы // Транспорт Урала. – 2004. – № 3. – С. 74–80.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРУТКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫДАВЛИВАНИЕМ ПОРИСТОЙ ЗАГОТОВКИ

Березин И.М., Поляков А.П., Поляков П.А.

*Институт машиноведения УрО РАН (ИМАШ УрО РАН)  
620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская 34, Россия,  
e-mail: [berezin@imach.uran.ru](mailto:berezin@imach.uran.ru)*

Выдавливание является одним из основных технологических процессов порошковой металлургии. Возникающие при выдавливании большие пластические деформации способствуют эффективному закрытию пор, оказывают положительное влияние на формирование структуры выдавленной заготовки [1]. Известно, что пластические деформации сопровождаются постепенным накоплением субмикроскопических нарушений сплошности и их развитием. При этом после выдавливания в изделии возникают значительные остаточные напряжения, способные вызвать развитие субмикро- и микроскопических трещин и появление макродефектов. Аналитические модели процесса позволяют определять усилие выдавливания и остаточную пористость прутков. Прогнозирование появления различного рода дефектов, возникающих в связи с влиянием формы деформирующего инструмента, величины вытяжки, условий контактного трения и других факторов является сложной задачей, требующей использования численных методов, в частности, метода конечных элементов, реализованного в современных системах инженерного анализа.

Цель работы – исследование напряженно-деформированного состояния прутков после разгрузки на основе компьютерного моделирования процесса прямого выдавливания пористых заготовок для определения местоположения и объяснения причин возникновения вероятных дефектов.

Для описания поведения материала при пластической деформации пористой заготовки использована модель Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN), описанная в работах [2–5]. Задача решалась в осесимметричной постановке методом конечных элементов в системе инженерного анализа Abaqus/Standard [6]. В качестве значения предела текучести деформируемого материала за основу принято значение, полученное на основе аналитического расчета энергосиловых параметров процесса выдавливания заготовок из порошка на основе железа и идентификации расчетных зависимостей по результатам эксперимента [7]. Материал заготовок обладает упругопластическими свойствами: модуль упругости 190 ГПа, коэффициент Пуассона 0,27, предел текучести в беспористом состоянии 433 МПа. Деформационное упрочнение материала основы не учитывается (идеальная пластичность). Коэффициент трения в законе Зибеля 0,3. Расчеты выполнены при исходном диаметре заготовки 10 мм и вытяжках  $\mu = 2,04, 2,78$  и 4. Начальная относительная плотность принята равной 0,88. Угол конусности матрицы (угол между образующей поверхности матрицы и осью канала) составляет  $\beta = 30^\circ$ .

В результате компьютерного моделирования процесса выдавливания исследован характер распределения остаточной пористости  $\theta$  и величины показателя напряженного состояния  $k = \sigma/\tau$  ( $\sigma$  – среднее нормальное напряжение;  $\tau$  – интенсивность касательных напряжений). Показано, что в различных зонах поперечного сечения прутка значения показателя  $k$  могут быть как положительными (жесткая схема напряженного состояния), так и отрицательными (мягкая схема напряженного состояния). Неравномерность напряженного состояния по сечению прутка возрастает с увеличением вытяжки. На периферии выдавленных прутков величина коэффициента напряженного состояния при изменении вытяжки практически не меняется, тогда, как на оси заготовки показатель  $k$  изменяется более чем в 3 раза. Установлено, что в слоях материала близких к внешней поверхности прутков ( $0,7 \dots 0,8R$ , где  $R$  – радиус прутка), наблюдается локализация растягивающих напряжений, тогда как на внешней поверхности прутков и на оси вращения преобладает мягкая схема напряженного состояния  $k < 0$ . Распределение пористости  $\theta$  в поперечном сечении прутка также крайне неравномерное, пористость уменьшается от оси симметрии прутка к его периферии, при этом с увеличе-

нием вытяжки степень неравномерности уменьшается. Анализ показал, что процесс прямого выдавливания пористых заготовок обладает существенными недостатками, предопределяющими получение дефектов как на поверхности прутков, так и во внутренней его части. С одной стороны, центральная часть прутка является наименее плотной и содержит большое количество пор и дефектов. С другой стороны, в слоях материала лежащих в непосредственной близости (0,7...0,8R) от внешней поверхности выдавленных прутков, в исследуемом диапазоне вытяжки, имеют место значительные растягивающие напряжения, которые способствуют возникновению и развитию кольцевых трещин.

#### Литература

1. Sjöberg G., Mironov V., Fischmeister H.E. Die-Filling and Densification in Hot Extrusion Forging of Porous Preforms // Powder Metallurgy Int. – 1977. – Vol. 9, no. 4. – P. 160–163.
2. Gurson A. L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth : Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Materials // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1977. – Vol. 99. – P. 2–15.
3. Tvergaard V. Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Condition // International Journal of Fracture Mechanics. – 1981. – Vol. 17. – P. 389–407.
4. Tvergaard V., Needleman A. Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar // Acta Metallurgica. – 1984. – Vol. 32. – P. 157–169.
5. Berezin I.M., Polyakov A.P. Mathematical modelling of drawing rods made of titanium sponge allowing for pore formation // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2016. – Vol. 57, no. 6. – P. 555–564.
6. ABAQUS 6.10 Theory Manual 2010, Providence, United States : Dassault Systemes Simulia Corp.
7. Поляков П. А., Залазинский А. Г., Поляков А. П. Исследование процесса выдавливания заготовок из ванадийсодержащего порошка железа // КШП ОМД. – 2014. – No. 12. – С. 10–14.

# THE DEPENDENCY OF MECHANICAL PROPERTIES ON MICROSTRUCTURE ANISOTROPY INDEX OF SOME ALLOYED STEELS

Maisuradze M.V.<sup>b)</sup>, Ryzhkov M.A.<sup>a)</sup>

*Russian Federation, Yekaterinburg, Ural Federal University, Mira str., 28, 620000,*

<sup>a)</sup>*e-mail: mt-243@mail.ru*

<sup>b)</sup>*e-mail: [spirallog@gmail.com](mailto:spirallog@gmail.com)*

The microstructure banding of 4340, 42CrMo4 and 20NC11 alloyed steels was estimated using the approach of the ASTM E 1268 standard. The values of the anisotropy index and micro hardness were obtained on the longitudinal specimens at the various distances from the center of the round steel bars with various diameters. The impact strength values in the transversal and longitudinal direction of the bars were obtained. The correlation of the anisotropy index values and the mechanical properties (micro hardness and impact strength) of the steels under consideration was derived.

## Introduction

Usually banded microstructure is observed in hot rolled carbon and alloyed steel products [1...5]. The main cause of its formation is the chemical inhomogeneity which occurs during the dendritic solidification of the steel ingot or billet [6...10]. The subsequent hot deformation (rolling, forging) and heat treatment reveals the bands with various microstructures: ferrite and pearlite bands, martensite and ferrite or bainite bands and so on [7...14]. The microstructure banding causes the anisotropy of the mechanical properties (because the crack movement is facilitated along the direction of the bands [15]), the reduction of a corrosion resistance [16]. Although some progress was achieved in understanding the nature of the microstructure banding, the existing technological routes designed to avoid banding [4, 17, 18] or to eliminate the initial cause of banding [19, 20] are still not effective [3] and even thermodynamically impossible [21].

Nowadays some standards are implemented to estimate the microstructure banding, but the most of them are based on the comparison of observed and the reference microstructures [22...24]. This results in only a qualitative estimation of banding. The quantitative estimation of microstructure banding [14, 25, 26] is a key factor for deriving correlations between mechanical or physical properties of steel and its microstructure characteristics and further production of steel with low microstructure in homogeneity.

## Experimental

The chemical composition of the hot rolled commercially produced steels under consideration is present in Table. The round steel bars with diameter 110...190 mm were annealed after the hot rolling. The steel specimens were heat treated using electrical chamber furnace and quenching tank with industrial oil. The austenitization temperature was 850 °C, the hold time was 60 min. The tempering temperature was 200 °C for the 20NC11 steel and 525 °C for the 4340 and 42CrMo4 steels, the hold time was 3 h.

Specimens of the 4340 steel (10Ч10Ч10 mm) were cut from the different positions of the cross section: near the surface, at the half of the radius and at the center of the bars with diameters 110, 140 and 190 mm. The quantitative estimation of the microstructure banding was conducted in accordance with ASTM E 1268 [14] using SIAMS 800 image analyzer. The studied area of each specimen was approx. 70 mm<sup>2</sup>. The anisotropy indexes (AI) were obtained at the different cross section positions of the bars with various diameters.

TABLE 1. Chemical composition of steels under consideration, mass. %

Steel	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P
4340	0.42	0.29	0.73	0.77	1.45	0.33	0.03	0.003	0.012
42CrMo4	0.35	0.24	0.74	0.90	0.08	0.18	0.21	0.006	0.010
20NC11	0.22	0.32	0.40	0.66	2.88	0.07	0.17	0.001	0.001

The microstructure of the steels was estimated using optical microscopy (Meiji IM7200). The microprobe analysis was conducted using scanning electron microscope Jeol JSM 6490. The micro hardness of the specimens was estimated using the HVS-1000A tester with the loads in the range 300...1000 g. At least 30 measurements were implemented for each type of the microstructure bands.

Specimens for the Charpy impact tests were cut from the steel bars in longitudinal and transversal directions so that the notch was in the same bar cross section area (half of the radius) for both specimens. The impact tests were conducted according to ASTM E23 at room temperature.

## Results and Discussion

Microstructure banding of the 4340 steel bars was revealed after the heat treatment. The bands were the tempered martensite (light bands) and the secondary sorbite (dark bands). The width of the alternating bands was approx. 100  $\mu\text{m}$ . The content of Cr, Ni, Mo and Mn in the dark microstructure bands was lesser (Mn – 0.60; Ni – 1.33; Mo – 0.19 mass. % respectively), than the average content of these elements in steel (Tab.). This was due to the dendritic origin of these microstructure bands as demonstrated in [6]. Various content of the alloying elements led to the local inhomogeneity of the austenite, formed martensite and its stability during tempering.

The decrease of the bar diameter (i. e. the increase of the degree of hot deformation) led to the increase of the steel anisotropy index in all of the cross section positions (Fig. 1). The lesser increase of the AI was obtained near the surface area of the steel bars (1.6 for 190 mm bar and 2.6 for 110 mm bar). It is evident that the surface of the steel bars was extremely deformed during the hot rolling. That is why the microstructure banding caused by chemical inhomogeneity at this area was decreased to greater values than in the bulk metal.

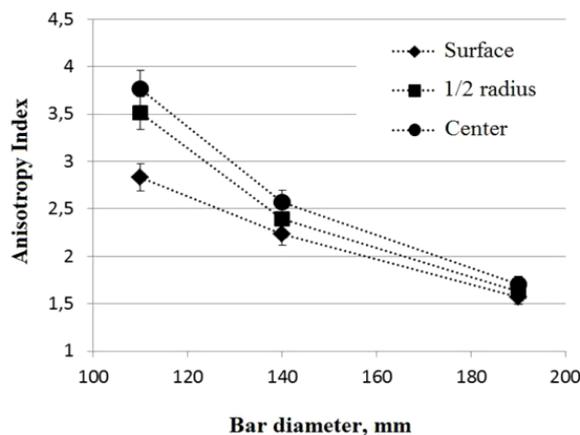


FIG. 1. The anisotropy index versus the diameter of the 4340 steel bar at various positions

At the center area of the steel bars the microstructure banding was more evident than at the surface area. The bands had sharp contrast and width approx. 225  $\mu\text{m}$ . The anisotropy index (AI) at the center area of the 190 mm bar was 1.7 and of the 110 mm bar it was 3.8. The possible reason of the microstructure banding increase with the increase of the degree of hot deformation was the higher deformation rate versus the diffusion rate of the alloying elements. As a result the interden-

drifted areas of the steel were shrunk and extended without sufficient redistribution of the alloying elements. This led to formation of explicit microstructure band boundaries in the bar of a smaller diameter.

The Charpy impact strength of the transversal specimens was lower than for the longitudinal ones in all cases (Fig. 2 *a*). The lowest impact strength of the transversal specimens was obtained in the case of the 42CrMo4 steel ( $0.17 \text{ MJ/m}^2$ ) while the longitudinal specimens of the steels under consideration exhibited the impact strength of  $0.8 \dots 1.0 \text{ MJ/m}^2$ . The impact strength ratios (value obtained for longitudinal versus transversal specimens) were 1.6 for the 4340 steel, 2.0 for the 20NC11 steel and 5.5 in case of the 42CrMo4 steel. The microstructure of the Charpy specimens revealed that the 42CrMo4 steel consisted of the contrast light and dark bands with sharp boundaries unlike the 4340 and 20NC11 steels consisted of the smooth bands. The difference of the microhardness values between the light and dark bands was 35 HV for the 4340 and 20NC11 steels and 55 HV for the 42CrMo4 steel. Anisotropy indexes were 3.7 for the 4340 and 20NC11 steels and 4.6 for the 42CrMo4 steel. It was evident that the sufficient decrease of the impact strength on the transversal specimens of the 42CrMo4 steel was attributed to the microstructure banding value.

The correlation between the impact strength ratio and the scatter of the microhardness values (characterized by means of the variation coefficient) is plotted on Fig. 2 *b*. The point with zero variation coefficients corresponds to the ideal isotropic material with the same impact strength values in longitudinal and transversal directions. The correlation between the impact strength ratio and the anisotropy index (i. e. microstructure banding) was also experimentally obtained. The 25 % increase in anisotropy index from 3.7 to 4.6 led to the increase of the impact strength ratio more than three times (from 1.6 to 5.5).

The obtained dependences made it possible to estimate the microstructure banding value by means of the values of mechanical properties (micro hardness and impact strength), from the one side, and to predict the variation of the mechanical properties (micro hardness and impact strength) using the banded structure anisotropy index, from the other. The present study outlines the further trend of investigations which would correlate the microstructure banding and the anisotropy of the mechanical properties of steels. This problem is urgent in case of the quality control at various stages of the steel production. For the subsequent commissioning of the proposed methods it is necessary to accumulate and analyze the considerable amount of the experimental data for various steel grades.

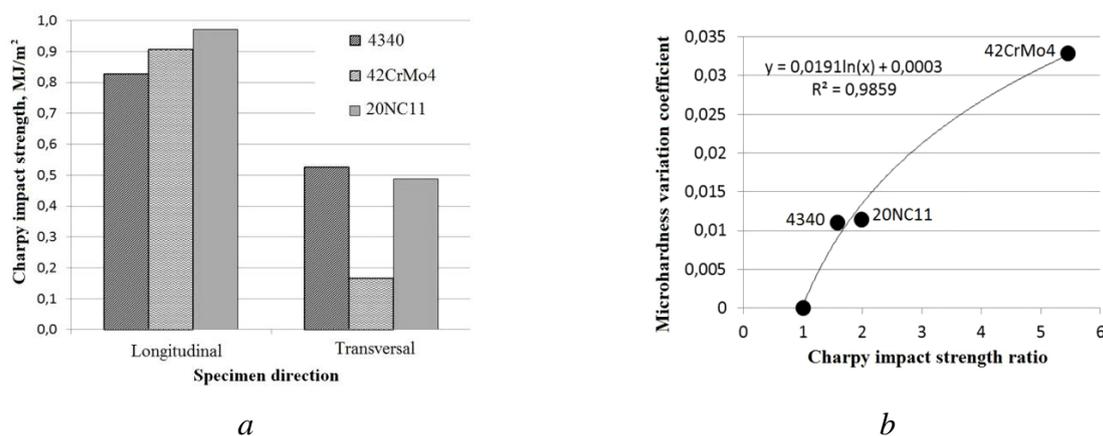


FIG. 2. The variation of the Charpy impact strength for longitudinal and transversal specimens (*a*) and the correlation between the micro hardness variation coefficient and the Charpy impact strength ratio (*b*) for the steels under consideration

## Summary

1. The values of the anisotropy index were obtained for the 4340 steel specimens at the various distances from the centre of the round steel bars with diameters  $110 \dots 190 \text{ mm}$ . The decrease in the bar diameter from 190 to 110 mm led to the increase of the anisotropy index from 1.6 to 2.6 for the surface area and from 1.7 to 3.8 for the central area of the bar cross section.

2. The Charpy impact strength of the steels 4340, 20NC11 and 42CrMo4 varies with the specimen direction. The maximum value of the Charpy impact strength ratio (value obtained for longitudinal versus transversal specimens) was obtained in the case of the 42CrMo4 steel (5.5). The 42CrMo4 steel was also characterized by the highest difference of the micro hardness values (55 HV) and the highest anisotropy index (4.6).

3. The correlation between the Charpy impact strength ratio, micro hardness scatter (the variation coefficient of the micro hardness values) and the anisotropy index was derived.

## Acknowledgments

The work is performed within the framework of the Grant of the Russian Federation President for young scientists Ph.D. MK-7929.2016.8 and was supported by the Russian Federation Ministry of Education and Science (project № 11.1465.2014/K) and the Russian Federation Government Act № 211, contract №02.A03.21.0006.

## References

1. J.A. Eckert, P.R. Howell and S.W. Thompson. *J. Mater. Sci.* **28**. 4412–4420 (1993).
2. J.D. Verhoeven. *J. Mater. Eng. Perform.* **9**. 286–296 (2000).
3. R.A. Grange. *Metal. Trans.* **2**. 417–426 (1971).
4. F.G. Caballero, A. Garcia-Junceda, C. Capdevila and C.G. de Andr s. *Mater. Trans.* **47**. 2269–2276 (2006).
5. L. Shi, Z. Yan, Y. Liu, X. Yang, Ch. Zhang and H. Li. *Int. J. Min. Metal. Mater.* **21**. 1167–1174 (2014).
6. G. Krauss. *Metal. Mater. Trans. B.* **34**. 781–792 (2003).
7. P.G. Bastien. *J. Iron Steel Inst.* **187**. 281–291 (1957).
8. D.A. Silin, I.N. Veselov, S.Yu. Zhukova, N.T. Tikhontseva and V.M. Farber. *Steel Transl.* **36**. 86–90 (2006).
9. J.S. Kirkaldy, J. von Destinon-Forstmann and R.J. Brigham. *Can. Metal. Quart.* **59**. 59–81 (1962).
10. L. Morales-Rivas, H. Roelofs, S. Hasler, C. Garcia-Mateo and F.G. Caballero. *J. Min. Metal. B.* **51**. 25–32 (2015).
11. A. Sakir Bor. *ISIJ Int.* **31**. 1445–1446 (1991).
12. P. Shanmugam and S.D. Pathak. *Eng. Fract. Mech.* **53**. 991–1005 (1996).
13. F.G. Caballero, J. Chao, J. Cornide, C. Garcia-Mateo and M.J. Santofimia. *Mater. Sci. Eng. A.* **525**. 87–95 (2009).
14. ASTM Standard E1268-01 (ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016).
15. F. D’Errico. *J. Fail. Anal. Prevent.* **10**. 351–357 (2010).
16. I.G. Rodionova, A.I. Zaitsev, O.N. Baklanova, A.Yu. Kazankov, V.V. Naumenko and G.V. Semernin. *Metallurgist.* **59**. 774–783 (2016).
17. P.E.J. Rivera-Diaz-del-Castillo and S. van der Zwaag. *Steel Res. Int.* **75**. 711–720 (2004).
18. W. Xu, P.E.J. Rivera-Diaz-del-Castillo and S. van der Zwaag. *ISIJ Int.* **45**. 380–387 (2005).
19. A.R. Marder. *Metal. Trans. A.* **13**. 85–92 (1982).
20. X.L. Cai, A.J. Garratt-Reed and W.S. Owen. *Metal. Trans. A.* **16**. 543–557 (1985).
21. C.F. Jatzak, D.J. Girardi and E.S. Rowland. *Trans. ASM.* **48**. 279–283 (1956).
22. Russian Federation Standard GOST 5640 (Standard Publishing, Moscow, 1988).
23. Russian Federation Standard GOST 801 (Standard Publishing, Moscow, 1979).
24. Italian Standard UNI 8449 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 1983).
25. C.C. Tasan, J.P.M. Hoefnagels and M.G.D. Geers. *Scripta Mater.* **62**. 835–838 (2010).
26. B. Krebs, A. Hazotte, L. Germain and M. Goun . *Image Anal. Stereol.* **29**. 85–90 (2010).

# ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

Макаров А.В.<sup>1,2</sup>, Самойлова Г.В.<sup>1</sup>, Гаврилов Н.В.<sup>3</sup>, Мамаев А.С.<sup>3</sup>,  
Осинцева А.Л.<sup>2</sup>, Куренных Т.Е.<sup>1</sup>, Саврай Р.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 18, Софьи Ковалевской, Екатеринбург, 620990, Россия

<sup>2</sup>Институт машиноведения УрО РАН, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия

<sup>3</sup>Институт электрофизики УрО РАН, 106, Амундсена, Екатеринбург, 620016, Россия,  
e-mail: av-mak@yandex.ru

Современным способом химического модифицирования термически неупрочняемых аустенитных хромоникелевых сталей является азотирование в плазме низкоэнергетического электронного пучка [1, 2]. Особый интерес представляет плазменное азотирование при температуре менее 450 °С, которое приводит к формированию метастабильной  $\gamma$ -фазы пересыщенного твердого раствора азота, обладающей высокой твердостью (12–15 ГПа) и коррозионной стойкостью. При более высоких температурах в приповерхностном слое стали формируется нитридная фаза. Поэтому актуальным является поиск способов, повышения скорости диффузии азота в объем модифицируемого материала при низких температурах азотирования. Эффективность процесса низкотемпературного плазменного азотирования может быть повышена проведением предварительных деформационных наноструктурирующих обработок, в частности, обработки SMAT [3]. Наноструктурирование и интенсивное деформационное упрочнение поверхностного слоя аустенитной хромоникелевой стали при одновременном формировании низкой шероховатости поверхности достигается проведением фрикционной обработки индентором из синтетического алмаза в среде аргона [4].

Цель работы – изучить упрочнение, насыщение азотом и фазовый состав поверхности аустенитной стали AISI 321 после комбинированной обработки, включающей наноструктурирующую фрикционную обработку и азотирование в плазме электронного пучка при температурах 250–500 °С, и для сравнения – после азотирования недеформированной крупнокристаллической стали. Измерениями микротвердости установлено, что минимальная температура эффективного азотирования в плазме электронного пучка аустенитной хромоникелевой стали AISI 321 составляет 350 °С. Предварительное наноструктурирование поверхностного слоя стали фрикционной обработкой индентором из синтетического алмаза в среде аргона обуславливает существенный рост глубины эффективно упрочненного азотированием слоя при температуре азотирования 350 °С. Методом ядерных реакций после азотирования в плазме электронного пучка при температурах 350–450 °С закаленной недеформированной стали установлены максимальные концентрации азота на поверхности (до 44 ат. %) и в слое на глубине 0,5–2,25 мкм (до 30 ат. %). Меньшие концентрации азота в предварительно деформированных образцах могут быть обусловлены оттоком азота в более глубокие слои наноструктурированной стали. Эффективное упрочнение поверхности при азотировании (до 1460 HV<sub>0,25</sub>) обусловлено формированием S-фазы (пересыщенный азотом аустенит  $\gamma_N$ ) при  $T_A = 350\text{--}400$  °С,  $\epsilon$ -фазы  $Fe_{2-3}N$  и  $\gamma'$ -фазы  $Fe_4N$ , а также нитрида хрома CrN, формирующегося на поверхности закаленной стали только при  $T_A = 500$  °С и при  $T_A = 450\text{--}500$  °С – в поверхностном слое наноструктурированной стали.

*Работа выполнена в рамках в рамках государственного задания ФАНО России по теме «Структура» № 01201463331 (проект № 15-9-12-45) и государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 01201354598 при поддержке РФФИ, проект № 15-08-07947.*

## Литература

1. Н. В. Гаврилов, А. И. Меньшаков. Журнал технической физики. 82 (3), 88–93 (2012).
2. Н. В. Гаврилов, А. С. Мамаев, А. В. Чукин. Письма в ЖТФ. 42 (9), 97–104 (2016).
3. Y. Lin, J. Lu, L. Wang, T. Xu, Q. Xue. Acta Materialia. 54, 5599–5605 (2006).
4. А. В. Макаров, П. А. Скорынина, А. Л. Осинцева, А. С. Юровских, Р. А. Саврай. Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). № 4 (69), 80–92, (2015).

## **SURFACE ACCURACY ANALYSIS OF RIGID REFLECTOR IN MECHANICAL AND THERMAL LOADING**

Moskvichev E.V.<sup>1</sup>, Khakhlenkova A.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Computational Technologies SB RAS, P.O. box 25515, Krasnoyarsk,  
660049, Russia, e-mail: [jugr@icm.krasn.ru](mailto:jugr@icm.krasn.ru)*

<sup>2</sup>*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk,  
660037, Russia, e-mail: [anja-nja-ha@yandex.ru](mailto:anja-nja-ha@yandex.ru)*

In the designs of deployable space reflectors the reflective face is traditionally represented by a metallized mesh. One of the main drawbacks of the mesh reflector is the requirement of its tension to ensure the necessary surface accuracy. This is achieved by using a large number of precision spokes and cable-stayed elements which can constitute a significant mass of the reflector. To reduce the weight, while simultaneously increasing its rigidity and the surface accuracy, the concepts of flexible precision reflectors are being developed. In these concepts, thin shells made of composite materials are used as the reflective face.

An example of such structures is a transformable precision large-scale reflector of space antennas, developed jointly by JSC Information Satellite Systems Reshetnev, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology and SDTB "Nauka" ICT SB RAS. The antenna design is a transformable axisymmetric parabolic reflector. The reflective face is a thin shell made of a carbon fiber reinforced polymer composite. The reflector unfolds due to the deployment drive mechanism and the stored elastic strain energy of the composite shell.

One of the key tasks at the design stage of the reflector was the estimation of the geometric stability and surface accuracy of the reflective face. The geometric stability was defined by the root-mean-square deviation (RMS) of the reflective face from its original shape. This parameter characterizes the reflector deformations caused by mechanical and thermal loads. A limited list of loads was considered, in order to evaluate the proposed concept of the reflector regarding the required RMS value. The force of Earth's gravity was considered as the mechanical load during ground tests of the reflector. Also the effect of forces caused by tension of the stiffening ring located on the periphery of the reflector was studied. Temperature deformations of the reflective face from solar heating and cooling during the stay of the reflector in the shade were considered as thermal loads.

Simulation of deformations of the reflector under the above loads was carried out by the finite element method. The reflector was modeled being in the deployed position. The range of RMS calculated values under various loads was from 0.02 to 0.18 mm. This allowed providing the required accuracy of the reflective face for the given reflector design. Thus, the use of a rigid composite shell as a reflective face is promising and requires further study. One of the next tasks that need to be solved is to evaluate the strength of the reflective face during its folding into the transport position.

*This work was done during the complex project and was financially supported by the Russian Federation Government (Ministry of Education and Science of the Russian Federation). Contract № 02.G25.31.0147.*

# EBSD-АНАЛИЗ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СПЛАВА Cu-Zn-Mn-Al-Fe-Ni ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

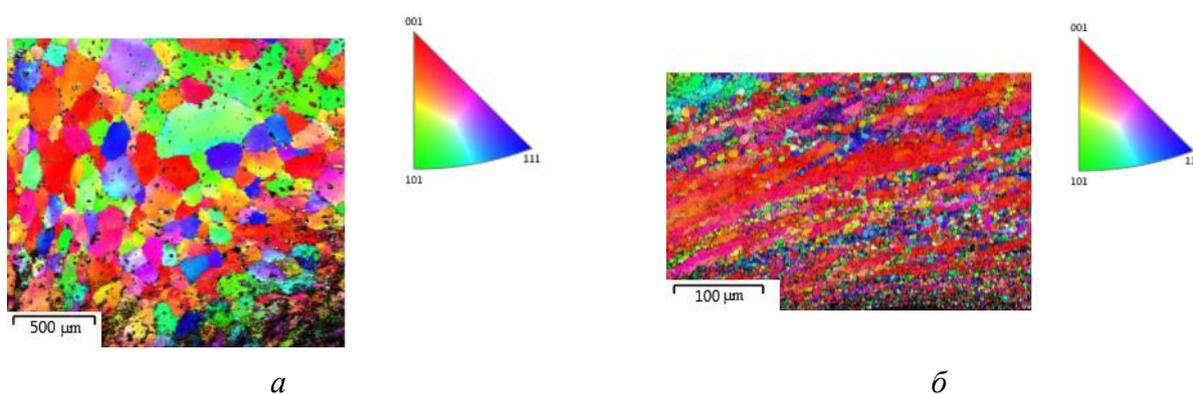
Пугачева Н.Б., Худорожкова Ю.В.

*Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Россия,  
e-mail: [nat@imach.uran.ru](mailto:nat@imach.uran.ru)*

Сплав Cu–Zn–Mn–Al–Fe–Ni представляет собой легированную латунь, предназначенную для изготовления деталей путем горячей обработки давлением. Основным недостатком этого сплава является опасность растрескивания заготовок после горячего деформирования из-за высоких остаточных напряжений. Для определения причин охрупчивания границ зерен и общего структурного состояния сплава после горячей штамповки целесообразно использовать возможности метода EBSD-анализа, позволяющего определить текстуру, разориентировку зерен, степень рекристаллизации.

Исследовали структуру кольцевой заготовки после горячей штамповки с предварительным нагревом до 780 °С (время выдержки при этой температуре составляло 12 мин). После штамповки заготовку обдували холодным воздухом для предотвращения чрезмерного роста зерна. После охлаждения кольца произошло образование трещины. Сплав имел следующий химический состав, мас. %: 34,7 Zn; 3,0 Mn; 2,3 Al; 0,5 Fe; 0,4 Ni; 0,16 Si; 0,15 Pb; Cu – остальное. Исследовали микроструктуру образца, вырезанного вблизи трещины. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе NEOPHON 21, а EBSD-анализ – при помощи программного комплекса HKL Channel 5 на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU с приставкой Oxford NKLNordlysF<sup>+</sup>. Была определена текстура β'-зерен, построены карты ориентировок, рекристаллизации и напряжений.

Показано, что в процессе горячей штамповки колец наблюдается неравномерная по сечению заготовки деформация (рисунок). В области с минимальной степенью деформации происходит динамическая полигонизация и образование сплошной сетки единичных мелких деформированных зерен с повышенными значениями твердости по границам исходных крупных зерен. Это приводит к повышению значений твердости вблизи границ зерен и хрупкому зернограничному растрескиванию заготовок при комнатной температуре под действием остаточных напряжений с образованием характерного ручьистого узора на изломе. В области с максимальной степенью деформации происходит динамическая рекристаллизация, эта зона представляет собой зону вязкого долома при развитии трещины.



Карты ориентировок сплава кольцевой заготовки на участке с минимальной деформацией (а) и на участке с максимальной деформацией (б)

*Работа выполнена при частичной поддержке проекта № 15-10-1-22 Фундаментальных научных исследований Уральского отделения РАН.*

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ В ПОЛОСТИ ОТВОДА ВОДЫ ПОЖАРНОГО ГИДРАНТА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Кондаков А.С.

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677000, г. Якутск, ул. Автоторожная, дом 20, Россия,  
e-mail: [kondak\\_aleksey@mail.ru](mailto:kondak_aleksey@mail.ru)*

Для районов с экстремально низкой температурой, предусматриваются установки незамерзающих водопроводных оборудований (арматур), обеспечивающие надёжную работу трубопроводных систем водоснабжения для выпуска воды при аварийных ситуациях и отбора воды при пожарах. Конструкции этих оборудований должны обеспечивать множеству требований, наиболее существенным, из которых является их работоспособность при любых климатических условиях, особенно при экстремально низких температурах окружающего воздуха. Существует множество технических решений по устройствам незамерзающих выпускных устройств для забора или слива воды, обеспечивающих их надёжность и работоспособность. Тем не менее, как показывают наблюдения, действующих водопроводных сетей населённых пунктов в Республике Саха (Якутия), почти полного отсутствия арматур и устройств на системах водоснабжения, изготовленных по изобретениям и патентам, предназначенных для северных условий. Одной из причин этого является отсутствие заводов-изготовителей, централизованно выпускающих арматуру и устройства северного исполнения, а своими силами изготовление предложенных видов устройств трудно осуществимо. Видимо по этой причине вместо сложных выпускных устройств в водопроводных трубах приваривают патрубки с запорным болтом для аварийного выпуска воды. В этих выпускных патрубках или отводах пожарных гидрантов стоячая вода, как правило, в зимнее время замерзает, и чтобы привести их в рабочее состояние при аварийных ситуациях, их оттаивают различными известными способами, теряя драгоценное время.

В данной работе рассматриваются тепловые расчёты для полости отвода воды под пожарным гидрантом Дорошевского, без и с теплопроводным стержнем, приваренным к прижимному диску клапана гидранта. Расчёты показывают, что снабжение прижимного диска клапана пожарного гидранта теплопроводным стержнем с хорошей теплопроводностью и омываемым проточной водой водопровода обеспечивает более надёжную работоспособность гидрантов при их эксплуатации в зимних условиях северных регионов.

# МЕТОД РИТМОКАРДИОГРАФИИ В ДИАГНОСТИКЕ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЛИЦ С НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

Акимова А.В., Миронов В.А., Миронова Т.Ф.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» МЗ РФ,  
ул. Репина, 3, г. Екатеринбург, 620028, РФ,  
e-mail: [anna\\_v\\_akimova@mail.ru](mailto:anna_v_akimova@mail.ru)

Признаки недифференцированной дисплазии соединительной ткани (НДСТ) могут встречаться у относительно здоровых людей, однако они нередко проявляются астенизацией, болевыми синдромами, психоэмоциональными нарушениями, вегетативной дисфункцией и являются фактором риска сердечнососудистых заболеваний.

Цель работы – оценить возможности метода ритмокардиографии в диагностике особенностей вегетативной регуляции синусового ритма сердца у лиц с недифференцированной дисплазией соединительной ткани.

## Материал и методы

Обследовано 67 студентов УГМУ с медианой возраста 22 (20÷23) года. Определялись внешние фены НДСТ по карте, специально разработанной для данного исследования на основании Национальных рекомендаций российского научного медицинского общества терапевтов 2015 года. При выявлении 6 и более внешних фенов, обследуемого включали в группу НДСТ (n = 43), лица, имеющие менее 6 фенов (n = 24), составили группу контроля. Группы были сравнимы по возрасту (p = 0,12).

Проведено исследование вариабельности сердечного ритма (ВСР) методом ритмокардиографии (РКГ). Обследование проводилось на аппаратно-программном комплексе (АПК) – КАП-РК-01-«Микор» (регистрационное удостоверение № ФС 02262005/2447-06 Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения). ВСР-показатели статистического анализа: медианы (25 % ч 75 %) продолжительности RR-интервалов в секундах на анализируемой РКГ, стандартная девиация всех волн от средней величины RR, среднеквадратические отклонения каждого вида флуктуаций: гуморально-метаболического (y1), симпатического (ym), парасимпатического (ys) влияний отделов вегетативной системы, средняя амплитуда дыхательной аритмии (ARA). Соотношение факторов регуляции в синусовом узле после разложения волновой структуры ВСР на 3 частотные составляющие в программе «Микор» представлено процентными долями воздействия на пейсмекеры: гуморально-метаболического влияния – в очень низкочастотном, симпатического – в низкочастотном и парасимпатического – в высокочастотном диапазонах по отношению к тотальному спектру, принятому за 100 %. Выполнялась фоновая запись в положении лежа на спине, маневр Вальсальвы-Бюркера, проба Ашнера-Даньини, активная ортопроба, проба с физической нагрузкой, проба Шеллонга II.

Для оценки статистической значимости полученных результатов использовали критерии Манна-Уитни и  $\chi^2$ . Различия достоверны при p < 0,05.

## Результаты

НДСТ с 6 и более внешними феноми выявлена у 64,2 % в исследуемой группе. У лиц с НДСТ достоверно чаще встречаются следующие фены: плоскостопие (p = 0,004), положительный тест запястья (p = 0,000), астеническая грудная клетка (p = 0,022), гипермобильность I пальца кисти (p = 0,002), тест I пальца (p = 0,02), переразгибание локтевого сустава (p = 0,000), переразгибание кисти (p = 0,01), высокое арковидное нёбо (p = 0,05), синдактилия II-III пальцев стопы (p = 0,05). Эти фены можно считать наиболее значимыми при диагностике НДСТ.

По данным РКГ группы были сравнимы по значениям межсистолических интервалов (p = 0,92), в фоновой регистрации РКГ различий исследуемых показателей не выявлено. Однако после маневра Вальсальвы-Бюркера группа НДСТ показала более высокие значения

ARA ( $p = 0,036$ ) и  $u_s$  ( $p = 0,056$ ). Подобная тенденция была зарегистрирована и после пробы Ашнера-Даньини ( $p = 0,07$ ;  $p = 0,07$ ). После пробы с физической нагрузкой лица основной группы имели тенденцию к более высоким значениям  $\sigma_s$  ( $p = 0,073$ ) и достоверно отличались менее продолжительным периодом восстановления ( $p = 0,001$ ).

## **Выводы**

1. НДСТ в исследуемой группе выявлена у 64,2 %.
2. Наиболее значимы для диагностики НДСТ плоскостопие, положительный тест запястья, астеническая грудная клетка, синдром гипермобильности суставов, высокое арковидное нёбо, синдактилия II-III пальцев стопы.
3. Среди лиц с множественными признаками ДСТ повышено вагусное влияние на регуляцию сердечного ритма.
4. Метод РКГ может выявить при НДСТ особенности регуляции сердечной деятельности, которые не определяются другими методами диагностики.

# РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМУФТОВОЙ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Старостин Н.П., Аммосова О.А.

*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, 20, ул. Автоторожная, Якутск, 677007, Россия,  
e-mail: nikstar56@mail.ru*

Полиэтиленовые (ПЭ) трубы, ввиду множества преимуществ по сравнению с металлическими аналогами, все чаще применяются при строительстве газопроводов. С ростом протяженности газопроводов из ПЭ труб крайне важным становится решение проблемы их оперативного ремонта при аварийных ситуациях в зимний период в северных регионах России. Сварочные работы при монтаже и ремонте газопроводов из полиэтиленовых труб рекомендуется проводить при температуре окружающего воздуха (ОВ) не ниже минус 15 °С. При более низких температурах воздуха сварочные работы рекомендуется проводить в легких отапливаемых конструкциях с поддержанием температуры из допустимого диапазона. Между тем такая сварка обусловлена большими энергетическими, непроизводительными затратами и длительной подготовкой, что неприемлемо в аварийных ситуациях.

Актуальной проблемой является разработка методов и средств оперативной сварки полиэтиленовых труб соединительными деталями с закладными нагревателями (ЗН) в зимних условиях без строительства отапливаемых укрытий. Привлечение средств математического моделирования позволит наиболее полно изучить тепловой процесс при электромужфтовой сварке, как на стадии оплавления, так и на стадии охлаждения сварного соединения, и найти эффективные способы управления тепловым процессом для разработки технологии сварки при температурах ниже нормативных.

Идея предлагаемого в работе подхода сварки ЗН при температурах воздуха ниже нормативных заключается в обеспечении в области сварного соединения регламентированной температуры путем предварительного подогрева области сварки с помощью нагревательной спирали самой муфты. После предварительного подогрева для достижения более однородного температурного поля муфта и труба выдерживаются определенное фиксированное время – технологическая пауза. Для поддержания необходимого темпа охлаждения муфта вместе с трубой укрываются теплоизоляционным материалом. Для определения продолжительностей предварительного подогрева, выравнивания, толщины теплоизоляции, мощности источника тепла при подогреве целесообразно использование методов математического моделирования.

В данной работе исследуется задача определения динамики температурного поля при электромужфтовой сварке в осесимметричной постановке. Поскольку в полимерных материалах не существует четко выраженной границы раздела фаз, фазовый переход учитывается в интервале температур. Для решения задачи использовалась библиотека свободного доступа Dofin/FEniCS. Моделирование температурных полей при электромужфтовой сварке проводилось для трубы марки ПЭ100 SDR 11 63×5,8.

Расчетами определены размеры оплавленной зоны в вертикальном сечении при сварке при различных температурах воздуха в момент завершения нагрева. Меньший размер оплавленной зоны при низкой температуре ОВ свидетельствует о меньшем объеме полученного расплава, следствием которого будет более интенсивная кристаллизация и формирование мелкой структуры материала сварного шва, приводящие к низкому значению прочности соединения. Результаты расчета показывают необходимость предварительного подогрева при сварке в условиях низких температур. Согласно расчетам проведения предварительного подогрева, выравнивания и применение теплоизоляции расчетной толщины, способствуют увеличению оплавленной зоны, которая сопоставима с зоной, полученной при допустимых температурах воздуха.

*Работа выполнена при поддержке Гранта Главы Республики Саха (Якутия) для молодых ученых, специалистов и студентов по научному направлению «Технические науки»*

# ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ СЛОИСТОЙ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЗАДАНИИ ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУР И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ СИЛ НА СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕ

Бурмашева Н.В.<sup>1,2</sup>, Просвиряков Е.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
ул. Мира, 19, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Россия,  
e-mail: [nat\\_burm@mail.ru](mailto:nat_burm@mail.ru), [evgen\\_pros@mail.ru](mailto:evgen_pros@mail.ru)

В экспериментальных работах Н.П. Петрова была установлена гидродинамическая природа процесса смазки [1]. В основе гидродинамической теории смазки лежат предположение о ньютоновской природе вязкой жидкости. Одно из используемых в рамках этой теории допущений состоит в том, что течение происходит через щель с медленно меняющейся шириной зазора. В результате получается характерное приближение, когда профиль скорости при любом значении горизонтальной координаты считается идентичным профилю скорости между бесконечными параллельными пластинами [2].

Изучение конвективных движений вязкой жидкости является одной из распространенных задач в самых разных теоретических и прикладных научных дисциплинах.

Особо интересным оказывается вопрос о наличии в слое жидкости застойных точек. Если решения уравнений Навье-Стокса и их модификации являются непрерывными функциями координат, то рядом с такими точками, как правило, образуются застойные зоны, т. е. области с обратным течением. Отыскание новых точных решений уравнений гидродинамики, описывающих появление застойных зон в жидкости, является актуальной задачей.

В работе предложено новое точное решение, описывающее движение вязкой несжимаемой жидкости под действием заданных на верхней границе тангенциальных сил, не являющихся результатом капиллярного эффекта. Характерной особенностью полученного решения является трехмерность полей давления и температуры по координатам. Ранее авторами было показано, что данное решение при определенных значениях параметров, задаваемых на границах слоя жидкости, допускает появление расслоений поля скорости [3, 4]. Полученное решение допускает существование в слое таких точек, в которых компоненты физических полей обращаются в ноль вне зависимости от значения горизонтальных координат. Кроме того, приведены примеры ситуаций, когда точек расслоения может быть несколько.

*Работа выполнена при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа УМНИК).*

## Литература

1. Смазочные материалы и проблемы экологии / А. Ю. Евдокимова, И. Г. Фукс, Т. Н. Шабалина, Л. Н. Багдасаров. – М. : ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2000. – 424 с.
2. Тадмос З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров / пер. с англ. – М. : Химия, 1984. – 632 с., ил. – Нью-Йорк. 1979.
3. Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю. Крупномасштабная слоистая стационарная конвекция вязкой несжимаемой жидкости под действием касательных напряжений на верхней границе. Исследование поля скоростей // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ. мат. науки. – 2017. – Т. 21, № 1. – С. 180–196.
4. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Exact solutions for layered large-scale convection induced by tangential stresses specified on the free boundary of a fluid layer : series of IOP Conference “Materials Science and Engineering” – 2017. – Vol. 208, conf. 1.

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ SiC НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ С МАТРИЦЕЙ ИЗ СПЛАВА Д16

Пугачева Н.Б., Быкова Т.М., Мичуров Н.С., Сенаева Е.И., Черемичина Э.Р.

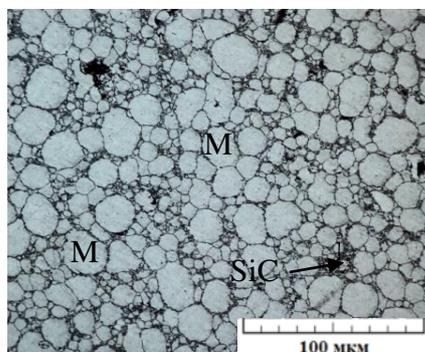
Институт машиноведения УрО РАН, 620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34, Россия,  
e-mail: [tatiana\\_8801@mail.ru](mailto:tatiana_8801@mail.ru)

Композиционные материалы с алюминиевой матрицей и карбидом кремния в качестве наполнителя обладают высокими прочностными свойствами, хорошей технологической обрабатываемостью и относительно низкой стоимостью. Введение в алюминиевые сплавы частиц наполнителя микронных размеров с резко отличной от матрицы твердостью повышает эксплуатационные свойства сплавов, что вследствие расширяет область их применения.

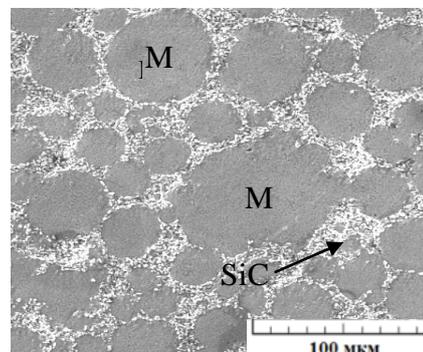
Цель данной работы – исследование микроструктуры алюмоматричных композитов (АМК) с разным содержанием наполнителя SiC, характера распределения наполнителя в алюминиевой матрице, определения микромеханических свойств методом кинетического индентирования и оценке температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и плотности композиционного материала.

Металлической матрицей материалов был выбран алюминиевый сплав Д16, системы Al–Cu–Mg следующего химического состава, в мас. %: 3,8–4,9 Cu, 1,2–1,8 Mg, 0,3–0,9 Mn, до 0,5 Fe, до 0,5 Si, до 0,25 Zn, до 0,15 Ti, до 0,1 Cr.

По структурному состоянию исследованные АМК представляют собой ячеистые композиты: по границам зерен матрицы сосредоточены частицы наполнителя, образующие сплошную сетку (рисунок). С повышением объемной доли наполнителя в композите толщина зон скопления частиц SiC увеличивается. Если при содержании наполнителя 5 об. % каждая его частица окружена алюминиевой матрицей, т. е. преобладают связи «матрица–SiC», то при содержании 10, 20 и 30 об. % SiC увеличивается доля связей «SiC–SiC».



*a*



*б*

Микроструктура исследованных композитов: *a* – распределение наполнителя в матрице композита с 5 об. % SiC; *б* – распределение наполнителя в матрице композита с 20 об. % SiC

Методом кинетического индентирования определены микромеханические свойства исследованных АМК. С увеличением содержания SiC значения<sup>1</sup> твердости и модуля упругости ( $E_{упр}$ ) возрастают, а условного показателя пластичности ( $\phi$ ) и ползучести ( $C_{II}$ ) уменьшаются (табл. 1). Содержание наполнителя определяет значения плотности и ТКЛР алюмоматричных композитов. Значения ТКЛР и плотности для алюминиевой<sup>1</sup> матрицы составляет  $\alpha = 24,6 \times 10^{-6} (K^{-1})$  и  $\rho = 2,69 \text{ г/см}^3$ ; для карбида кремния (SiC)  $\alpha = 4,0 \times 10^{-6} (K^{-1})$  и  $\rho = 3,21 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, с<sup>1</sup> увеличением доли карбида кремния в алюмоматричных композитах уменьшаются значения ТКЛР, а значения плотности – возрастают.

Таблица 1 – Влияние содержания SiC на свойства композитов

Содержание SiC, об. %	HV 0,01	$E_{упр.}$ , ГПа	$\varphi$ , %	Ползучесть, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	ТКЛР, $10^{-6}(K^{-1})$
5	105	69	89	0,7	2,7	20
10	120	79	88	0,7	2,74	18
20	140	85	87	0,6	2,82	17,5
30	155	86	87	0,6	2,9	16,5

Исследованные алюмоматричные композиты имеют ячеистое строение: по границам гранул матрицы расположены частицы наполнителя SiC, образующие сплошную сетку. Показано, что значения ТКЛР,  $\varphi$  и  $C_{IT}$  с увеличением количества SiC уменьшаются, а плотности, твердости и  $E_{упр}$  – возрастают. Исследование микромеханических свойств АМК методом кинетического индентирования при нагрузке 100 мН позволило определить свойства каждой структурной составляющей в отдельности. Расположенные рядом структурные составляющие оказывают влияние друг на друга, а получаемые значения свойств характеризуют композит в целом.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФ №14-19-01358.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВАРКИ СЕДЛОВЫХ ОТВОДОВ К ПОЛИЭТИЛЕНОВЫМ ТРУБАМ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Старостин Н.П., Васильева М.А.

*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
20, ул. Автодорожная, г. Якутск, 677007, Российская Федерация,  
e-mail: [nikstar56@mail.ru](mailto:nikstar56@mail.ru), [ewawa@mail.ru](mailto:ewawa@mail.ru)*

Седловые отводы с закладными нагревателями широко применяются при строительстве систем газоснабжения для монтажа ответвлений от магистральных и распределительных газопроводов к промышленным и бытовым потребителям. Работы по монтажу дополнительных ответвлений обычно проводятся в период завершения строительства газопровода – обычно в осенне-зимнее время, когда температура воздуха ниже предельно допустимой для проведения сварки полиэтиленовых труб. При температурах окружающего воздуха ниже минус 15 °С сварку полиэтиленовых труб рекомендуется проводить под укрытием, в котором поддерживается температура из допустимого температурного интервала.

Ранее был предложен способ сварки стыковой и электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб на открытом воздухе при температурах ниже нормативных на основе управления тепловым процессом. Для определения технологических параметров, обеспечивающих требуемую динамику температурного поля при низких температурах ОВ, использовались методы математического моделирования и информационных технологий. Управляя тепловыми процессами, были найдены технологические параметры математических моделей поставленных задач. При этом соответствующие уравнения теплопроводности решались методом конечных разностей, эффективным для решения задач в областях простой формы.

В работе предложена математическая модель теплового процесса в сварном соединении с учетом теплоты фазового перехода при оплавлении и кристаллизации полиэтилена при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе. Ввиду сложной геометрии рассматриваемой области приварки седлового отвода, численное решение нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности производилось с использованием метода конечных элементов. Расчеты проводились для седлового отвода 110/63 и трубы ПЭ 100 SDR 11 (подаваемое в нагревательный элемент напряжение 39,6 В, время нагрева 210 сек). При низких температурах окружающего воздуха анализ температурных полей теплового процесса при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе показал необходимость проведения предварительного подогрева, позволяющего получить температуру, достаточной для того, чтобы изменение температурного поля в зоне сварного соединения при охлаждении под теплоизоляционным материалом было близко к допустимой динамике. При температуре окружающего воздуха минус 40 °С расчетами найдена мощность источника теплоты подогрева равная 17 В, и продолжительность подогрева – 12 мин. Продолжительность технологической паузы при этом составляет 4 мин. Толщина теплоизоляции равна 2 см. Найденные технологические параметры обеспечивают в зоне термического влияния допустимый температурный режим приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе.

На основе анализа температурных полей показано, что при температурах воздуха ниже нормативных предварительный подогрев с помощью штатного закладного нагревателя седлового отвода и свариваемого участка полиэтиленовой трубы перед оплавлением по регламентированному режиму и охлаждение под слоем теплоизоляции расчетной толщины позволяют получить динамику температурного поля, свойственную при сварке в условиях допустимых температур.

# ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЯХ НА ОСНОВЕ СМОЛЫ ЭД-20 НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ

Смирнов С.В.<sup>1</sup>, Веретенникова И.А.<sup>1</sup>, Смирнова Е.О.<sup>1</sup>, Пестов А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения  
Уральского отделения Российской академии наук, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского Уральского отделения Российской академии наук,  
22, Софьи Ковалевской, Екатеринбург, 620990, Россия

Цель настоящей работы – исследование влияния наноразмерных оксидов  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $ZnO$  – модификаторов эпоксидного лака на основе эпоксидной смолы ЭД-20 на микротвердость, ползучесть и модуль упругости получаемого покрытия.

В работе использовали эпоксидно-диановую смолу марки ЭД-20 производства ФКП «Завод им. Я.М. Свердлова» (г. Дзержинск) с эпоксидным числом 21,1 %. В качестве модификаторов использовали коммерческие оксид титана (IV) (чистота 99,5 %, размер частиц 21 нм), оксид кремния (IV) (чистота 99,5 %, размер частиц 10–20 нм), оксид цинка (II) (чистота 99,5 %, размер частиц < 100 нм) производства Sigma–Aldrich. Подобные лаки широко применяются в народном хозяйстве для покрытия деревянных поверхностей, при изготовлении шпатлевок, для финишной отделки изделий из металла. В качестве основы для покрытия применялись пластины алюминий-магниевого сплава АМг6.

Исследования проводились с использованием автоматизированной системы для измерения микротвердости FISCHERSCOPE HM2000 XYm. В качестве характеризующих параметров были выбраны твердость  $HM$  по шкале Мартенса, приведенный (контактный) нормальный модуль упругости  $E_{IT}$ , определяемый методом инструментального индентирования, ползучесть материала  $C_{IT}$ . При индентировании использовали два режима нагружения – треугольный и трапецеидальный.

В результате были получены следующие данные. Введение добавки диоксида титана увеличивает значение твердости по Мартенсу для эпоксидного лака на 5 % по сравнению с немодифицированным лаком, введение оксида цинка и диоксида кремния приводят к уменьшению твердости по Мартенсу – на 4 и 5,5 % соответственно.

Значения нормального модуля упругости для эпоксидного лака, содержащего диоксида титана, увеличивается на 16 % по сравнению с немодифицированным лаком, для покрытия, содержащего оксида цинка, значения остаются на уровне немодифицированного лака, а с наполнителем диоксида кремния – уменьшаются на 9 %.

Микромеханические свойства исследованных материалов зависят от времени, в течение которого происходит увеличение механической нагрузки. В диапазоне  $t_n$  от 1 до 40 с все образцы проявляют вязкие свойства, выражающиеся в уменьшении твердости при уменьшении скорости приложения нагрузки. Дальнейшее увеличение времени  $t_n$  оказывает незначительное влияние на величину твердость для всех исследованных образцов.

Ползучесть покрытий под нагрузкой в большей степени обусловлена полимерной основой, вводимые добавки не оказывают существенного влияния на характер зависимости от времени, но снижают значения  $C_{IT}$ .

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-01154.*

## INFLUENCE OF LONG-TERM OPERATION ON STRUCTURE AND FATIGUE DURABILITY OF 09Mn2Si PIPE STEEL

Panin S.V.<sup>1,3,a)</sup>, Maruschak P.O.<sup>2,b)</sup>, Vlasov I.V.<sup>1,3,c)</sup>, Eremin A.V.<sup>1,3,d)</sup>, Byakov A.V.<sup>1,3,e)</sup>, Syromyatnikova A.S.<sup>5,6,f)</sup>, Stankevich R.<sup>3,g)</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russia*

<sup>2</sup>*Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, 56, Ruska str., Ternopil, 46001, Ukraine*

<sup>3</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia*

<sup>4</sup>*North-Eastern Federal University, 58 Belinsky str, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677027, Russia*

<sup>5</sup>*Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, 1, Oktyabrskaya str., Yakutsk, 677891, Russia,*  
*e-mail: <sup>a)</sup>svp@ispms.tsc.ru, <sup>b)</sup>maruschak.tu.edu@gmail.com, <sup>c)</sup>vlasov.ilya.viktorovich.@gmail.com, <sup>d)</sup>eremin\_av@bk.ru,*  
*<sup>e)</sup>biakov.anton@gmail.com, <sup>f)</sup>a.s.syromyatnikova@mail.ru, <sup>g)</sup>roman3014@mail.ru*

Main oil and gas pipelines are strategic industrial facilities and monitoring their mechanical state as well as investigating the reasons of their structure degradation during long term operation are actual scientific and engineering problems. These studies are of special importance for oil and gas pipelines that operate for a long time in the Far North.

Degradation of 09Mn2Si steel of the main gas pipeline “Mastah–Berge–Yakutsk” after 37 years of operation was investigated. Repair and replacement of pipes permanently take place at the pipeline being related to their failures which were accompanied by a number of catastrophic incidents. The main factors to give rise to the failure of pipeline components are complex climatic conditions, corrosive wear during operation, and also deformation aging induced by prolonged exposure to static loads, heterogeneity in the structure of the steel, and earth ground motion.

In this concern, the study of metal structure degradation processes and their effect on the mechanical properties of the 09Mn2Si pipe steel are of importance for understanding and developing techniques for retardation structural changes during long-term operation.

It is shown that the long-term operation does not result in a noticeable redistribution of cementite since during the exploitation the pipes operate at low pressure and low temperatures. However, its hydrogenation can occur which can give rise to decarburization. Deformation aging is poorly expressed and is manifested through the precipitation of finely dispersed carbides in the grain bodies.

The revealed structure degradation exerts little effect on the mechanical properties measured under static tension tests and hardness measurement. The reason is related to the development of two competing processes: 1) softening as a result of the decarburization; 2) hardening as a result of pitting dislocations onto carbide precipitates.

The fatigue durability of the steel after the long-term operation has decreased by ~16 %. It is shown that in the degraded steel the main fatigue crack originates earlier that is associated with the accumulation of structural and mechanical defects in the material. The calculated dependences of the transverse strain component versus specimen's displacement indicate for the microstructural changes which result in lower ductile. The reason for the latter is governed by the sensitivity to the accumulation of fatigue damages, especially at the stage of fatigue crack initiation.

# INFLUENCE OF STRESS CONCENTRATOR SHAPE AND TESTING TEMPERATURE ON IMPACT BENDING FRACTURE OF 17Mn1Si PIPE STEEL

Panin S.V.<sup>1,2,a)</sup>, Vlasov I.V.<sup>1,2,b)</sup>, Maruschak P.O.<sup>3,c)</sup>, Moiseenko D.D.<sup>1,d)</sup>,  
Berto F.<sup>4,e)</sup>, Vinogradov A.<sup>4,f)</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russia*

<sup>2</sup>*Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, 56, Ruska str. Ternopil, 46001, Ukraine*

<sup>3</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia*

<sup>4</sup>*Norwegian University of Science and Technology, Richard Birkelands vei 2b, 7491 Trondheim, Norway,*

<sup>a)</sup>[svp@ispms.tsc.ru](mailto:svp@ispms.tsc.ru), <sup>b)</sup>[vlasov.ilva.viktorovich@gmail.com](mailto:vlasov.ilva.viktorovich@gmail.com), <sup>c)</sup>[maruschak.tu.edu@gmail.com](mailto:maruschak.tu.edu@gmail.com),

<sup>d)</sup>[mdd@ispms.tsc.ru](mailto:mdd@ispms.tsc.ru), <sup>e)</sup>[berto@gest.unipd.it](mailto:berto@gest.unipd.it), <sup>f)</sup>[alexei.vino@gmail.com](mailto:alexei.vino@gmail.com)

A common tendency in transportation pipeline development, particularly, for main gas and oil pipelines, is a gradual increase in their service life and performance [1]. The problem is particularly acute since the pipelines often operate in unfavorable weather conditions, e. g., at low temperatures. A challenging task in this respect is to extend the service life of pipe steels by improving their mechanical properties [2]. Specifically, the fracture toughness – the major characteristics of crack resistance – has to be increased.

Main detrimental factors affecting the strength and crack resistance of pipe steels are attributed to tensile stresses and corrosion of the outer surface of pipes arising in underground conditions due to delamination or rupture of protective coating and localized corrosion of the inner surface.

Currently available approaches to characterizing the base metal ductility allow estimating the dynamic crack initiation conditions that are crucial for the prevention of gas and oil pipeline failure. Developing robust methods for the fracture energy determination in pipe steels with account of the shape of stress concentrators. These data can be used to account for the influence of embrittlement factors on the impact deformation resistance of pipe steels.

Furthermore, modern low-carbon steels produced by thermomechanical processing of the initial sheet have different sensitivity to the concentrator shape and temperature/force loading parameters. It is therefore important to understand the fracture mechanisms operating at different stress stiffness values.

It was considered the influence of the notch shape on the impact fracture of 17Mn1Si steel at different temperatures with a focus on the low temperature fracture behavior. The analysis of the shape of impact loading diagrams and energy fracture values for impact loaded specimens of pipe 17Mn1Si steel revealed the fracture mechanisms of this steel depending on the notch shape.

It was found that the test temperature reduction plays the decisive role in plastic strain localization and subsequent impact fracture of specimens with different-shaped notches. This is reflected in localization of deformation processes, decrease in crack propagation energy, and “degradation” of shear lips.

## References

1. S.H. Hashemi Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 85, pp. 879–884, 2008.
2. A.B. Arabei, I.Yu. Pyshmintsev, V.M. Farber, V.A. Khotinov, A.O. Struin Failure of pipe steel of X80 (K65) strength class, *Steel in Translation*, vol. 42, pp. 212–218, 2012.

## КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ТВЕРДОТЕЛЬНОМ ВРАЩЕНИИ

Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Российская Федерация,  
e-mail: [alex55gor@mail.ru](mailto:alex55gor@mail.ru), [evgen\\_pros@mail.ru](mailto:evgen_pros@mail.ru)*

Изучение влияния силы Кориолиса на перенос тепла в жидкости к настоящему времени основывается на экспериментальных исследованиях и натуральных наблюдениях природных явлений. Теоретические исследования осуществляются при помощи класса точного решения для сдвиговых течений вязкой несжимаемой жидкости. Аналитические решения конвективного стационарного течения Экмана вязкой несжимаемой жидкости способны прояснить механизмы вертикальной закрутки жидкости при тепловой стратификации.

Рассматривается точное решение переопределенной системы уравнений Обербека-Буссинеска с учетом силы Кориолиса в приближении  $f$ -плоскости (один параметр Кориолиса). Скорость жидкости на верхней свободной поверхности является постоянной. Рассматривается крупномасштабное движение жидкости при малых числах Фруда. Такие течения реализуются вблизи оси вращения и конвективной центробежной силой можно пренебречь. Структура точного решения системы Обербека-Буссинеска для температуры и давления определяется специальной линейной формой относительно горизонтальных координат; скорости  $V_x$  и  $V_y$  однородны – являются функциями только вертикальной координаты  $z$  [1–4].

После подстановки представления решения в исходные уравнения получена краевая задача для системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, аналитическое решение которой получено последовательным интегрированием в виде полиномов и квазиполиномов относительно переменной  $z$ .

Показано, что структура решений позволяет сохранить адвективную производную в уравнении теплопроводности, что приводит к возможности моделирования расслоений полей температуры и давления и описанию противотечений во вращающемся океане. Проведено сравнение полученных выражений для гидродинамических полей с изотермическим течением жидкости в экваториальной зоне и в поле сил Кориолиса. Показано, что возможно расслоение полей температуры и давления.

### Литература

1. Сидоров А. Ф. О двух классах решений уравнений механики жидкости и газа и их связи с теорией бегущих волн // Прикладная механика и техническая физика. – 1989. – № 2. – С. 34–40.
2. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9, № 3. – С. 3–9.
3. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 294–301.
4. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарная сложная конвекция при граничных условиях III рода на границах слоя жидкости // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2016. – Iss. 2. – P. 34–47. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2016-2/2016-2\\_81.html](http://dream-journal.org/issues/2016-2/2016-2_81.html).

## УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ИСПЫТАНИЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОЙКОСТИ К БЫСТРОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ ТРЕЩИН В ПЭ ТРУБАХ

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

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, ул. Автомоторная 20, г. Якутск, 677007 Россия,  
e-mail: [yuristan@yandex.ru](mailto:yuristan@yandex.ru), [io1982@mail.ru](mailto:io1982@mail.ru), [spira\\_ira\\_vas@mail.ru](mailto:spira_ira_vas@mail.ru)

Разработан и апробирован новый упрощенный экспериментальный метод испытания на определение стойкости к быстрому распространению трещин в ПЭ трубах, основанный на экспериментально регистрируемом явлении вырождения при понижении температуры «рисунка губ сдвига» на поверхностях излома образцов трубных марок полиэтиленов в испытаниях на трещиностойкость образца с надрезом в температурно-скоростном диапазоне. Апробация метода подтвердила существенную разницу в значениях нижних допустимых температурных границ эксплуатации газопроводов из ПЭ труб для материалов ПЭ80 ( $T \approx -5$  °С) и ПЭ100 ( $T \approx -20$  °С).

К настоящему времени сформировалась концепция, согласно которой надежность полиэтиленовой трубы, прежде всего газовой, обуславливается совокупностью трех ключевых параметров (показателей): минимальной длительной прочностью (MRS), стойкостью к медленному (SCG) и стойкостью к быстрому (RCP) растрескиванию. Последний фактор играет определяющую роль при выборе марки материала полиэтиленового трубопровода для условий холодного климата и накладывает ограничение по допустимой нижней границе эксплуатационных температур.

В основе предлагаемого (разработанного) метода лежит идея использования экспериментально регистрируемого явления вырождения, при понижении температуры, «рисунка губ сдвига» на поверхностях излома образцов трубных марок полиэтиленов в испытании на трещиностойкость в температурно-скоростном диапазоне, доступном для серийно-выпускаемых стандартных испытательных машин, оснащенных термокриокамерой.

Считается установленным фактом существование температурной границы (температуры перехода,  $T_{пер}$ ), определяющей возможность распространения быстрой трещины (область  $T < T_{пер}$ ), связанной с процессом формирования так называемых «губ сдвига» на поверхностях разрушения образцов ПЭ труб [1]. Они начинают проявляться при температуре испытаний, несколько меньшей  $T_{пер}$  и имеют ограниченную ширину – меньше 0,5 мм [2]. При  $T \geq T_{пер}$  губы сдвига быстро растут приводя к торможению и остановке трещины.

На рис. 1 и 2 представлены фотографии поверхностей разрушения (изломов) образцов трубных марок полиэтиленов, изготовленных из труб ПЭ80 и ПЭ100 (SDR11, Ø110) в форме полосок с размером ( $h \times b \times L$ ):  $9 \times 26 \times 120$  мм, тип 2, с краевым односторонним надрезом. Надрезы глубиной (l) наносили ножовочным полотном с последующим заострением лезвием безопасной бритвы. Испытания образцов на растяжение проведены на машине UTS 20K при скорости движения нагружающей траверсы 500 и 1000 мм/мин, в температурном диапазоне 0 ч  $-30$  °С, при расстоянии между захватами 60 мм.

Представленные фотографии четко фиксируют отсутствие и наличие губ сдвига на поверхностях излома образцов при визуальном контроле момента «вырождения рисунка» губ сдвига в испытаниях.

Интерпретация результатов в рамках представлений (положений) механики разрушения, с учетом специфики механического поведения аморфно-кристаллического полимера (полиэтилен), представляется следующей. На поверхностях излома образцов в момент наступления неустойчивости (старт быстрой трещины) имеются прямой (условия плоского деформированного состояния, ПДС) и косой (губы сдвига – условия плоского напряженного состояния, ПНС) участки излома. Вязкость разрушения материала в решающей степени определяется затратами энергии на локальное пластическое деформирование в вершине трещины при ее росте. При этом пластическое деформирование в аморфно-кристаллическом полимере может происходить по двум основным механизмам – вынужденно-эластическим

сдвиговым деформациям с образованием полос скольжения или вынужденно-эластическим деформациям растяжения с образованием микротрещин (крейзообразования).

При низкотемпературных испытаниях видимый рисунок губ сдвига не образуется в силу относительно малой протяженности зоны распространения условий ПНС по толщине образца (рис. 1 а, 2 в). Они начинают проявляться при температуре несколько меньшей  $T_{пер}$  и имеют, как указывалось ранее, ширину – менее 0,5 мм. В этой области температур общая вязкость разрушения образца контролируется сопротивлением разрушению в области плоского излома (ПДС). Трещина нормального отрыва распространяется в образце по типу «туннеля» – от надреза по центру образца и, частично, по его толщине. Боковые перемычки (ПНС) разрываются путем сдвига при достижении достаточно больших смещений у вершины трещины, так что трещина в целом распространяется смешанным образом – пробиванием туннеля при разрушении путем отрыва в сочетании с торможением косым изломом (губами сдвига – среза, ПНС). При  $T > T_{пер}$  губы сдвига быстро растут, приводя к аресту трещины.

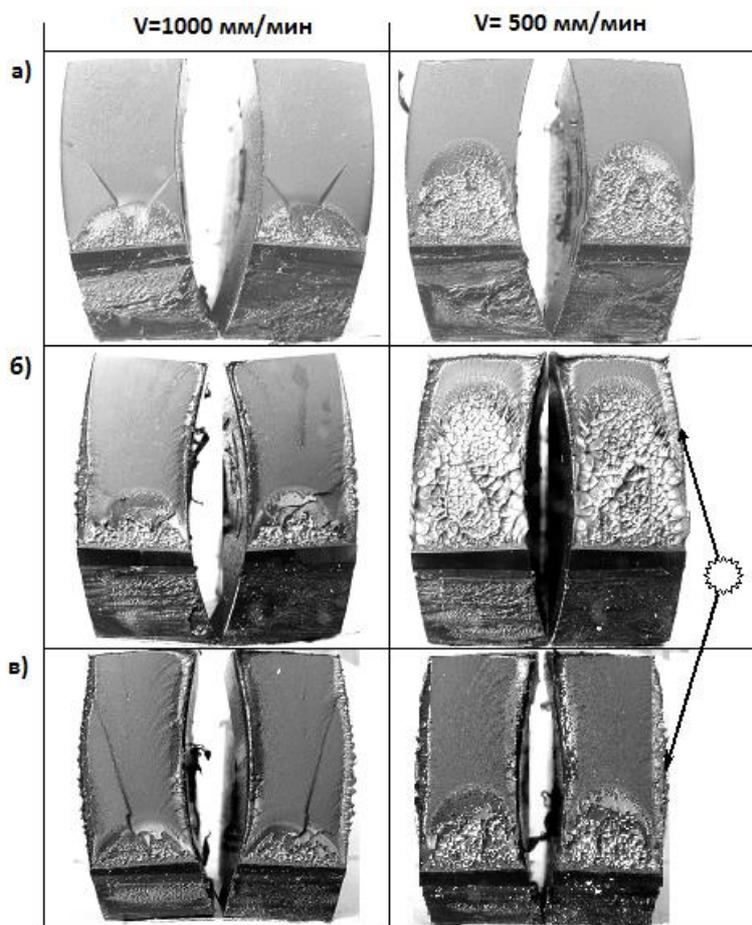


Рис. 1. Поверхности разрушения образцов труб ПЭ80 (размер образцов 2), испытанных при температурах (Т): а –  $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $l/b = 0,35$ ; б –  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $l/b = 0,35$ ; в –  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $l/b = 0,2$  и двух скоростях ( $V_{исп}$ ): 1000 мм/мин и 500 мм/мин;  – губы сдвига

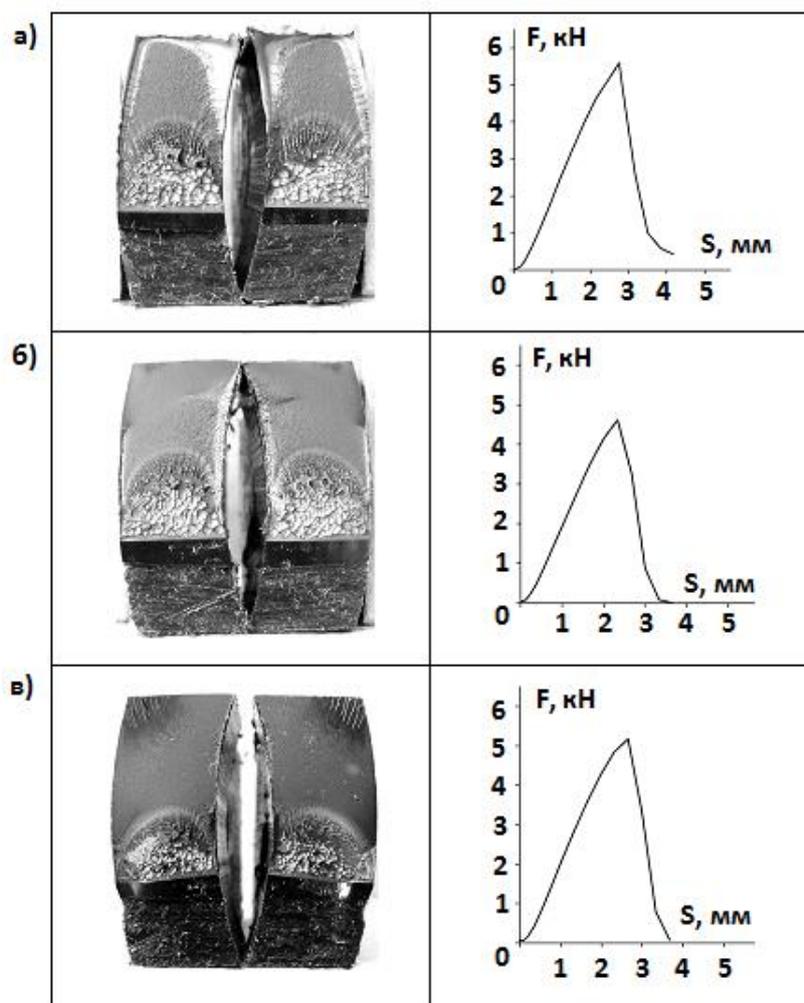


Рис. 2. Поверхности разрушения и диаграммы нагрузка-перемещение образцов труб ПЭ100 (размер образцов 2;  $l/b = 0,35$ ) и испытанных при скорости 1000 мм/мин и температурах ( $T$ ):  
 а –  $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б –  $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в –  $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Разработан и апробирован новый упрощенный экспериментальный метод испытания на определение стойкости к быстрому распространению трещин в ПЭ трубах, основанный на экспериментально регистрируемом явлении вырождения при понижении температуры «рисунка губ сдвига» на поверхностях излома образцов трубных марок полиэтиленов в испытаниях на трещиностойкость образца с надрезом в температурно-скоростном диапазоне.

Реализация методики позволит снизить трудоемкость и технические требования к испытательному оборудованию. Произведенная в рамках разработанной методики оценка допустимой нижней температуры эксплуатации полиэтиленового газопровода показала существенную разницу значений показателей для материалов ПЭ80 ( $T \approx -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и ПЭ100 ( $T \approx -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

#### Литература

1. Carla F. Martins, Mohammad A. Irfan, Vikas Prakash. Dynamic fracture of linear medium density polyethylene under impact loading conditions/Materials Science and Engineering A 465 (2007), 211–222.
2. Ritchie S.J.K., Davis P., Leever P.S. Brittle-tough transition of rapid crack propagation in polyethylene/ Polymer, Vol. 39, Number 25, 1998, pp. 6657–6663.

## ПРОЕКТНЫЕ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ПРОЧНОСТИ КАРКАСА РЕФЛЕКТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., Филиппова Ю.Ф.

*Институт вычислительных технологий СО РАН (Красноярский филиал),  
д. 53, пр. Мира, г. Красноярск, 660049, Россия,  
e-mail: [sdoronin@ict.nsc.ru](mailto:sdoronin@ict.nsc.ru)*

Цель исследования заключается в обосновании перечня и определении количественных значений коэффициентов запаса силовой конструкции рефлектора в диапазоне его эксплуатационных нагрузений.

Основные результаты представлены расчетными коэффициентами запаса по среднеквадратическому отклонению отражающей поверхности зеркала, Эйлеровой силе стержней и пределу прочности материала каркаса в условиях гравитационного, ветрового и температурного нагружения в широком диапазоне геометрических положений рефлектора в пространстве, характеризующихся углом наклона фокальной оси к горизонту и углом между фокальной осью и направлением ветрового потока.

Сравнительный анализ коэффициентов запаса по среднеквадратическому отклонению поверхности зеркала является основой для выбора предпочтительного варианта геометрической формы и размеров отражающих сегментов. Наименьшие значения коэффициентов запаса позволяют установить расчетные случаи нагружения. Коэффициент запаса по пределу прочности, как правило, оказывается большим по сравнению с коэффициентом запаса по Эйлеровой силе. Это означает большую опасность потери устойчивости стержневых элементов каркаса по сравнению с опасностью их разрушения.

Полученные результаты являются информационной базой практической оптимизации силовых конструкций рефлекторов и служат основой системного анализа проектных расчетов крупногабаритных прецизионных рефлекторов.

## ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ СИЛОВОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕФЛЕКТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Доронин С.В.

*Институт вычислительных технологий СО РАН (Красноярский филиал),  
д. 53, пр. Мира, г. Красноярск, 660049, Россия,  
e-mail: [sdoronin@ict.nsc.ru](mailto:sdoronin@ict.nsc.ru)*

Цель исследования заключается в обосновании перечня и содержания критериев предельных состояний силовой конструкции рефлектора из полимерных композиционных материалов с учетом ее структурной сложности и особенностей системного взаимодействия элементов конструкции.

Анализ напряженно-деформированных состояний позволил сформулировать следующий перечень предельных состояний, характерных для силовой конструкции рефлектора из полимерных композиционных материалов:

- предельные состояния, связанные с однократным выходом параметра состояния за допускаемые пределы при квазистатическом нагружении при действии гравитационных и ветровых нагрузок (потеря устойчивости стержней каркаса; разрушение стержней каркаса; разрушение силовых элементов крепления каркаса);
- предельные состояния, связанные с однократным выходом параметра состояния за допускаемые пределы при динамическом нагружении при действии синусоидальной вибрации и акустического шума;
- предельные состояния, связанные с длительной деградацией конструкционного материала.

Рассмотренные критерии предельного состояния практически используются на основе численных оценок напряженно-деформированного состояния конструкции. Критерии практически использованы при проектных расчетах рефлекторов антенн наземного базирования системы спутниковой связи  $Q/K_a$  частотного диапазона. Диаметр рефлектора находится в диапазоне от 9 до 12 м, а отношение фокусного расстояния к диаметру – в диапазоне от 0,3 до 0,5. Полученные количественные оценки продемонстрировали свою адекватность и позволили обосновать решения по конструктивной оптимизации, касающиеся пространственной структуры каркаса и характеристик поперечного сечения его элементов. Используемые критерии предельных состояний обеспечивают необходимый и достаточный объем расчетов по обеспечению требуемых технических характеристик рефлектора.

## ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ В МАРТЕНСИТНОМ СОСТОЯНИИ НА РАЗВИТИЕ В2-L1<sub>0</sub> МАРТЕНСИТНЫХ ПЕРЕХОДОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СПЛАВОВ Co<sub>38</sub>Ni<sub>33</sub>Al<sub>29</sub>

Ефтифеева А.С., Панченко Е.Ю., Тимофеева Е.Е., Чумляков Ю.И.

*Сибирский физико-технический институт Национального исследовательского Томского государственного университета, 1, пл. Новособорная, г. Томск, 634050, Россия, e-mail: [anna\\_eftifeeva@rambler.ru](mailto:anna_eftifeeva@rambler.ru)*

На монокристаллах ферромагнитного сплава Co<sub>38</sub>Ni<sub>33</sub>Al<sub>29</sub> (ат. %) с различной объемной долей  $\gamma$ -фазы ( $f = 2\%$ ,  $f = 15\%$ ) установлены основные закономерности влияния старения при 398 К в течение 1 часа в мартенситном состоянии под нагрузкой 430–550 МПа, приложенной вдоль [011]<sub>B2</sub>-направления, на температуры термоупругих В2-L1<sub>0</sub> мартенситных превращений (МП) ( $M_s$ ,  $M_f$  – температуры начала и конца прямого МП,  $A_s$ ,  $A_f$  – температуры начала и конца обратного МП), температурный гистерезис  $\Delta T$  и функциональные свойства.

Особенности развития В2-L1<sub>0</sub> МП в исследуемых кристаллах были изучены при охлаждении/нагреве в свободном состоянии  $|\sigma_{вш}| = 0$  и под действием постоянной сжимающей нагрузки  $|\sigma_{вш}| = 150$  МПа, приложенной вдоль [001]<sub>B2</sub>-направления. Функциональные характеристики термоупругих В2-L1<sub>0</sub> МП представлены в таблице.

Функциональные свойства термоупругих В2-L1<sub>0</sub> МП в монокристаллах Co<sub>35</sub>Ni<sub>35</sub>Al<sub>30</sub>

Объемная доля $\gamma$ -фазы $f$ , %	$ \sigma_{вш}  = 150$ МПа							$ y_{вш}  = 0$
	До старения в мартенситном состоянии							
	$M_s$ , К	$M_f$ , К	$A_s$ , К	$A_f$ , К	$\Delta_1 = M_s - M_f$ , К	$\Delta_2 = A_f - A_s$ , К	$\Delta T$ , К	$ \epsilon_{ДЭПФ} $ , %
2	240	214	251	268	26	17	16	–
15	320	260	308	357	60	49	47	–
После старения в мартенситном состоянии								
2	169	133	180	209	36	29	24	3,0
15	265	182	252	341	83	89	91	1,2

Экспериментально показано, что независимо от объемной доли  $\gamma$ -фазы старение в мартенситном состоянии смещает температуры МП при охлаждении/нагреве под нагрузкой  $|\sigma_{вш}| = 150$  МПа в низкотемпературную область относительно исходного состояния на  $\Delta M_s = 71$  К ( $f = 2\%$ ) и  $\Delta M_s = 55$  К ( $f = 15\%$ ) (табл.). Смещение температур МП приводит к расширению температурных интервалов прямого и обратного переходов. Температурные интервалы  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  после старения в мартенситном состоянии для кристаллов с  $f = 2\%$  увеличиваются на 10–12 К, для кристаллов с  $f = 15\%$  – на 23–40 К. Кристаллы с  $f = 2\%$  характеризуются минимальными интервалами  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  как в исходном, так и в состаренном состоянии, по сравнению с  $f = 15\%$ . Температурный гистерезис  $\Delta T$ , характеризующий рассеяние энергии, увеличивается после старения в мартенситном состоянии для исследуемых кристаллов. В состаренных кристаллах с  $f = 2\%$  и  $f = 15\%$  величина  $\Delta T$  равна 24 и 91 К, соответственно (табл.).

Впервые экспериментально показано, что в старенных в мартенситном состоянии монокристаллах наблюдается растягивающий двусторонний эффект памяти формы вдоль [001]<sub>B2</sub>-направления с величиной обратимой деформации  $|\epsilon_{ДЭПФ}| = 3,0\%$  ( $f = 2\%$ ) и  $|\epsilon_{ДЭПФ}| = 1,2\%$  ( $f = 15\%$ ). Величина обратимой деформации при ДЭПФ зависит от объемной доли  $f$ , так как частицы  $\gamma$ -фазы не испытывают МП.

Изменения функциональных свойств термоупругих В2-L1<sub>0</sub> МП в монокристаллах ферромагнитного сплава Co<sub>38</sub>Ni<sub>33</sub>Al<sub>29</sub> с объемной долей  $\gamma$ -фазы  $f = 2\%$  и  $f = 15\%$  вызваны стабилизацией L1<sub>0</sub>-мартенсита и возникновением внутренних растягивающих полей напряжений, действующих вдоль [001]<sub>B2</sub>-направления.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, № 16-08-00179.*

## ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВДАВЛИВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО УДАРНИКА В ДЕФОРМИРУЕМОЕ ТЕЛО

Залазинская Е.А., Залазинский А.Г.

*Институт машиноведения УрО РАН, 620049 г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34, Россия,  
e-mail: [Zalazinskaya@mail.ru](mailto:Zalazinskaya@mail.ru), [zalaz@list.ru](mailto:zalaz@list.ru)*

Осуществлено математическое и компьютерное моделирование удара и высокоскоростного вдавливания на значительную глубину твёрдого цилиндрического ударника с плоским торцом в массивное деформируемое тело-мишень. Рассмотрены основные стадии внедрения ударника на глубину, при которой входной канал заполняется деформируемым материалом мишени. С использованием экстремальной теоремы теории идеальной пластичности и теоремы об изменении кинетической энергии для различных стадий проникания ударника определены границы области интенсивного пластического течения деформируемого материала мишени, поля скоростей и ускорений частиц деформируемой среды, длина входного канала и глубина вдавливания цилиндрического ударника в мишень. Разработано программное обеспечение, позволяющее в интерактивном режиме осуществлять моделирование процесса деформации материала мишени и движения ударника.

В результате проведенного исследования установлено: с увеличением длины ударника увеличивается размер пластической области, уменьшается абсолютная величина ускорения и увеличивается глубина проникания; процесс заполнения входного канала деформируемым материалом мишени сопровождается некоторым увеличением размера пластической области; глубина проникания слабо зависит от плотности деформируемой среды и существенно увеличивается с уменьшением предела текучести материала мишени.

Результаты компьютерного моделирования согласуются с данными глубокого проникания пули в мишень из сплава алюминия, установленными экспериментально.

# КРАТКОВРЕМЕННАЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ Ti-5Al И GRADE 2 ПРИ НАГРЕВЕ В ВОЗДУХЕ И АРГОНЕ

Замараев Л.М.<sup>1</sup>, Смирнов С.В.

*Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Россия*

Целью данной статьи являлось изучить влияние гелия на закономерности кратковременной высокотемпературной ползучести технически чистого титана Grade 2 и сплава Ti-5Al, относящихся к однофазным  $\alpha$ -сплавам, в сопоставлении с результатами исследований ползучести в воздушной среде.

Представлены результаты исследований кратковременной ползучести технически чистого титана Grade 2 и сплава Ti-5Al в воздухе и гелии при температурах от 673 до 1323 К. Определены эмпирические коэффициенты в зависимости  $v = A\sigma^n \exp(-\Delta H/RT)$ , устанавливающей связь между скоростью  $v$ , температурой  $T$ , номинальным напряжением  $\sigma$  и энергией активации процесса ползучести  $\Delta H$ . Установлено, что при испытаниях в среде гелия, по сравнению с испытаниями на воздухе, проявление признаков кратковременной ползучести смещается в область более высоких температур и наблюдается значительное снижение скорости ползучести при одинаковых номинальных напряжениях во всем температурном диапазоне испытаний.

## HIGE-TEMPERATURE SHORT-TERM CREEP OF GRADE 2 AND Ti-5Al TITANIUM ALLOYS WHEN HEATED IN AIR AND HELIUM.

Zamaraev L.M.<sup>1</sup>, Smirnov S.V.<sup>1</sup>

*Russian Academy of Science Ural Branch Institute of Engineering Science.  
34, Komsomolskaya str., Ekaterinburg, 620219, Russia*

The aim of this paper is to study the effect of argon on the regularities in the short-term high-temperature creep of Grade 2 commercially pure titanium and the Ti-5Al alloy, which are single-phase  $\alpha$ -alloys, in comparison with studying creep in the air environment. Short-term creep of Grade 2 commercially pure titanium and the Ti-5Al alloy in air and helium are comparatively studied at test temperatures ranging between 673 K and 1323 K. Empirical coefficients are determined in the dependence  $v = A\sigma^n \exp(-\Delta H/RT)$  relating creep rate  $v$  to temperature  $T$ , nominal stress  $\sigma$  and creep activation energy  $\Delta H$ . It is found that heating in a helium environment, as compared to heating in air, decreases the rate of high-temperature short-term creep and increases creep strength at identical nominal stresses in the entire range of test temperatures.

## АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА РАСТЯЖЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT16, ЗАКАЛЕННОГО С РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Илларионов А.Г., Степанов С.И., Демаков С.Л.

*ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, e-mail: s.i.stepanov@urfu.ru*

VT16 (Ti–3Al–5Mo–5V) относится к двухфазным ( $\alpha+\beta$ )-титановым сплавам мартенситного класса, упрочняемым в ходе термообработки – закалки и старения. После закалки сплав VT16 может подвергаться холодной деформации. Возможность проведения холодной деформации закаленного сплава зависит от его структурно-фазового состояния, которое, во многом, определяет уровень пластических характеристик. Формирование структуры, фазового состава и комплекса механических свойств в сплаве VT16 при закалке от температур нагрева в широком интервале нами рассмотрено в работах [1, 2]. Остается неосвещенным вопрос о взаимосвязи процесса разрушения при испытании на растяжение с фазовым составом и уровнем пластичности сплава после закалки, рассмотренный в этой работе.

Исследование проведено на отожженных горячекатаных прутках диаметром 11 мм из сплава VT16 состава Ti – 3,33Al – 5,18Mo – 4,57V (мас. %), подвергнутых закалке в воду от температур нагрева 700–875 °С после выдержки 1 ч (шаг между температурами 25 °С). После закалки полученные образцы испытаны на растяжение по ГОСТ 1497-84. Поверхность разрушения испытанных образцов исследована на растровом электронном микроскопе FEI Quanta 3D.

Анализ фрактографических данных показал, что после всех температур закалки полученные изломы по ориентации прямые со скосами типа «конус-чашка». Для поверхности «чашки» характерно волокнистое строение, между ней и «конусом» (зоной среза) отсутствует радиальная зона, характерная при развитии хрупкого разрушения. Отсутствие хрупкого разрушения подтверждается и тем, что у всех образцов на поверхности излома наблюдается выраженный ямочный рельеф, характерный для вязкого типа разрушения. Размер ямок хорошо коррелируют со средним размером  $\alpha$ -зерна, полученным в ходе закалки и составляющим около 3 мкм ( $T_3 = 700\text{--}775$  °С), 5 мкм ( $T_3 = 800$  °С), 10–13 мкм ( $T_3 = 825\text{...}850$  °С), ~ 70 мкм ( $T_3 = 875$  °С) [1]. Из этого следует, что процесс разрушения начинается на межфазной границе раздела  $\alpha/\beta$ , а затем распространяется в тело  $\beta$ -зерна с образованием ямок, сопоставимых с размером зерна.

Для образцов, закаленных с температур в интервале 700–825 °С и содержащих значительное количество  $\alpha$ -фазы (от 60 –  $T_3 = 700$  °С до 20 % –  $T_3 = 825$  °С [1]) обнаружено, что контур поверхности чашки и конуса имеют характерную эллипсовидную форму. При этом по мере увеличения температуры закалки и соответственно уменьшения в структуре объемной доли  $\alpha$ -фазы фиксируется уменьшение отношения длин продольной к поперечной оси эллипса, относящегося к конусной части разрушения. Зафиксировано появление в изломах образцов после  $T_3 = 750, 775$  °С характерных впадин (выступов) между чашкой и конусом, что, по-видимому связано с реализацией в ходе испытаний деформационно-индуцированного  $\beta\text{-}\alpha''$ -превращения [2], которое дестабилизирует распространение трещины в ходе разрушения.

Установлена хорошая корреляция между уровнем относительного удлинения образцов, закаленных от разных температур, и соотношением размеров центральной волокнистой зоны чашки и периферийной зоны конуса. Более высокие значения относительного удлинения зафиксированы при увеличении ширины зоны конуса и уменьшения размеров зоны чашки, что является характерным для более пластичных материалов.

### Литература

1. Влияние температуры закалки на структуру и свойства титанового сплава. Структура и фазовый состав / А. А. Попов, А. Г. Илларионов, С. И. Степанов, О. А. Елкина, О. М. Ивасишин // ФММ. – 2014. – Т. 115, № 5. – С. 539–548.
2. Влияние температуры закалки на структуру и свойства титанового сплава. Физико-механические свойства / А. А. Попов, А. Г. Илларионов, С. И. Степанов, А. А. Попов, О. М. Ивасишин // ФММ. – 2014. – Т. 115, № 5. – С. 549–554.

# ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СЛОИСТОЙ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЗАДАННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ НА ДНЕ

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*

При описании крупномасштабных движений в бесконечно протяженном слое вязкой несжимаемой жидкости возможно использование слоистых течений, у которых вектор скорости  $(U(z,t); V(z,t); 0)$  зависит только от поперечной координаты и времени.

Данный класс течений относят к сдвиговым потокам, которые могут быть описаны при помощи точных решений уравнений Навье-Стокса для изотермических и конвективных течений. К сдвиговым движениям вязкой несжимаемой жидкости относятся течения Куэтта, Пуазейля, Экмана, Стокса, Остроумова-Бириха и некоторые другие. В статьях [1–3] были получены и исследованы точные решения уравнений Обербека-Буссинеска для термокапиллярной и термоконцентрационной конвекции вязкой несжимаемой жидкости. Решения были вычислены для линейной зависимости температуры, концентрации и давления от продольных координат:

$$T = T_0(z,t) + xT_1(z,t) + yT_2(z,t);$$

$$C = C_0(z,t) + xC_1(z,t) + yC_2(z,t);$$

$$P = P_0(z,t) + xP_1(z,t) + yP_2(z,t)$$

при выполнении условий прилипания на дне. Известно, что это условие не является единственным при моделировании океанологических течений. Широко используется задание касательных напряжений на дне водоема. Как правило, их полагают равными нулю, что соответствует учету идеального трения на дне. Однако в рамках точных решений уравнений Навье-Стокса и Обербека-Буссинеска представляет интерес исследовать течения с заданными напряжениями на обеих границах слоя жидкости. Изучение влияния напряжения на дне слоя жидкости важно для понимания условий применимости классического условия прилипания и возможности использования условия Стокса не только в микромасштабах.

Анализ построенных течений жидкости позволил установить влияние касательных напряжений на число критических точек в потоке.

## Литература

1. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю., Спевак Л. Ф. Нестационарная слоистая тепловая и концентрационная конвекция Марангони вязкой несжимаемой жидкости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 445–455.
2. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю., Спевак Л. Ф. Нестационарная конвекция Бенара-Марангони слоистых течений вязкой несжимаемой жидкости // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – № 2. – С. 137–146.
3. Prosviryakov E.Yu., Spevak L.F. Exact solutions to problems on stationary and unsteady layered convection of a viscous incompressible medium // AIP Conf. Proc. 1785, 040048 (2016); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4967105>.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ ПРИ УЧЕТЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА

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](mailto:lfs@imach.uran.ru)*

Изменение температуры приводит к возникновению конвективного движения даже в очень вязких несжимаемых жидкостях. В этом случае определяющий вклад в структуру течения вносит термокапиллярный эффект, проявляющийся вблизи границ слоев жидкости. Для неоднородных материалов конвективные переносы тепла определяют прочностные характеристики. При моделировании технологических процессов важно иметь определенный запас точных решений уравнений движения несжимаемых сред. Рассмотрено течение двух ньютоновских сильновязких несжимаемых жидкостей, движущихся без перемешивания. При построении точного решения уравнений Обербека-Буссинеска использовалось не приближение Стокса, а полная система уравнений. Это позволило построить стационарное и нестационарное поля скоростей двухслойной жидкости для термокапиллярного течения, в каждом слое которой скорость не меняет направление. Отсутствие противотечений, описанное для конвекции Марангони вязкой несжимаемой жидкости [1–3], объясняется использованием условия прилипания и тождественным равенством нулю сил инерции.

### Литература

1. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю., Спевак Л. Ф. Нестационарная слоистая тепловая и концентрационная конвекция Марангони вязкой несжимаемой жидкости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 445–455.
2. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю., Спевак Л. Ф. Нестационарная конвекция Бенара-Марангони слоистых течений вязкой несжимаемой жидкости // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – № 2. – С. 137–146.
3. Prosviryakov E.Yu., Spevak L.F. Exact solutions to problems on stationary and unsteady layered convection of a viscous incompressible medium // AIP Conf. Proc. 1785, 040048 (2016); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4967105>.

# РЕШЕНИЕ ВЫРОЖДАЮЩЕГОСЯ НЕЛИНЕЙНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С ЗАДАННОЙ ФУНКЦИЕЙ ИСТОЧНИКА МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Спевак Л.Ф.<sup>1</sup>, Казаков А.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИМАШ УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620034, Россия

<sup>2</sup>ИДСТУ СО РАН, 134, ул. Матросова, Иркутск, 664033, Россия

В работе рассмотрены одномерные краевые задачи для нелинейного уравнения параболического типа [1, 2]

$$u_t = uu_{xx} + \frac{1}{\sigma} u_x^2 + \varphi(u), \quad \varphi(0) = 0. \quad (1)$$

для следующих видов краевых условий:

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

$$u|_{x=0} = f(t), \quad f(0) = 0, \quad f'(0) > 0. \quad (3)$$

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

Численные алгоритмы на основе метода граничных элементов (МГЭ) для решения уравнения (2) без функции источника, когда  $\varphi(u) \equiv 0$ , при краевых условиях (3)–(5) разработаны ранее в работах [3–5]. В данной работе этот же подход развит на случай известной функции источника. Построены пошаговые по времени алгоритмы решения для двух видов краевых условий (2) и (3). На каждом шаге по времени методом граничных элементов итерационно решается задача для уравнения Пуассона.

Решены тестовые примеры. Сравнение результатов расчетов с известным точным решением показало хорошую точность разработанных алгоритмов.

*Работа выполнена при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН, проект № 15-7-1-17 и 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, pp. 6918–6928.
5. Spevak L.F., Kazakov A.L. Constructing numerical solutions to a nonlinear heat conduction equation with boundary conditions degenerating at the initial moment of time // AIP Conf. Proc. 1785, 040076 (2016).

# ОБ АНАЛИТИЧЕСКОЙ РАЗРЕШИМОСТИ ОДНОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Казаков А.Л.<sup>1,2,a)</sup>, Лемперт А.А.<sup>2,b)</sup>, Кузнецов П.А.<sup>2,c)</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия

<sup>2</sup>Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,

134, ул. Лермонтова, Иркутск, 664033, Россия,

e-mail: <sup>a)</sup>kazakov@icc.ru, <sup>b)</sup>lempert@icc.ru, <sup>c)</sup>pav\_ku@mail.ru

В настоящей работе получил дальнейшее развитие подход к исследованию нелинейных задач математической физики, разработанный ранее в научной школе А.Ф. Сидорова и применяемых авторами для решения краевых задач с вырождением для нелинейного уравнения теплопроводности (the porous medium equation). Суть подхода состоит в том, что решение задач строится в виде кратных степенных рядов, причем их коэффициенты определяются рекуррентно при решении систем линейных алгебраических уравнений (как правило – трехдиагональных), размерность которых неограниченно возрастает с ростом порядка коэффициентов. Сходимость построенных рядов доказывается методом мажорант, при этом построение мажоранты сводится к задаче Коши для обыкновенного дифференциального уравнения, разрешенного относительно старшей производной, для которой справедлива одна из классических теорем Коши. Тем самым, для изучаемой краевой задачи доказывается теорема существования и единственности решения, являющаяся аналогом теоремы Коши-Ковалевской в рассматриваемом случае.

Особенностью проведенного исследования является то, что впервые для нелинейного уравнения теплопроводности рассмотрена задача специального вида с данными на подвижном замкнутом многообразии, которая обобщает две известных постановки: задачу об иницировании тепловой волны (задача А.Д. Сахарова) и задачу о построении тепловой волны при известном законе движения фронта. Доказана новая теорема существования и единственности решения в классе аналитических функций, при этом предложена конструктивная схема построения коэффициентов рядов, благодаря чему построенные разложения могут быть использованы для тестирования численных методов решения рассмотренной (и ей подобных) задач, разработкой которых также занимаются авторы.

Дальнейшие исследования в данном направлении могут быть связаны как с увеличением количества независимых пространственных переменных до трех, так и с применением предложенных подходов для решения конкретных задач, связанных с приложениями.

## КОНЦЕПЦИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕРСУБЪЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ КОВКИ

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

*Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия,  
e-mail: [avk@imach.uran.ru](mailto:avk@imach.uran.ru)*

Многовариантность проектирования технологииковки состоит в том, что результаты решения технологических задач взаимосвязаны и всегда должны принадлежать определенным технологическим интервалам. Задача выбора рационального решения каждой технологической задачи из соответствующего интервала зависит от преследуемых при этом целей.

Цель работы – разработка концепции поиска рациональных (интерсубъективных) решений технологических задач автоматизированного проектирования технологииковки в зависимости от поставленных целей.

В результате проведенных исследований с использованием основных положений теории принятия решений в нечетких условиях по схеме Беллмана–Заде предложена концепция выбора интерсубъективных решений задач проектирования технологии свободнойковки из множества допустимых решений.

На примере решения конкретной технологической задачи расчета размеров осаженого слитка при поставленной нечеткой интерсубъективной цели хорошей проработки металла в готовой поковке и одновременно не очень высокой трудоемкости изготовления этой поковки сформулированы три нечеткие субъективные цели.

*Субъективная цель 1:* трудоемкость последующейковки осаженого слитка должна быть по возможности минимальной.

*Субъективная цель 2:* качество проработки металла после осадки должно быть по возможности максимальным.

*Субъективная цель 3:* качество проработки металла в готовой поковке должно быть хорошим.

Рассмотрены вопросы формализации нечетких субъективных целей и выбора функций принадлежности возможных решений субъективным целям, компоновки этих функций в интерсубъективную функцию принадлежности результирующего решения задачи множеству допустимых решений в зависимости от важности субъективных целей и выбора окончательного интерсубъективного решения.

Описанная в настоящей статье концепция решения технологических задач в условиях нечетких целей позволяет выбирать из множества допустимых решений наиболее рациональные решения, соответствующие поставленным целям, пусть даже нечетким, сокращает участие пользователей в процессе автоматизированного проектирования и может быть использована для разработки алгоритмов и программ проектирования технологииковки других видов поковок.

## ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ

Филин С.А.<sup>1</sup>, Роголин В.Е.<sup>2,3</sup>, Каплунов И.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,  
36, Стремянный пер., 36, г. Москва, 117997, Россия*

<sup>2</sup>*ОАО «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»,  
95, Волоколамское ш., г. Москва, 125424, Россия*

<sup>3</sup>*Тверской государственный университет; 33, ул. Желябова, г. Тверь, 170100, Россия,  
e-mail: [Kaplunov.IA@tversu.ru](mailto:Kaplunov.IA@tversu.ru)*

Очистка лазерных зеркал из меди, её сплавов и подобных материалов традиционными растворителями от эксплуатационных и технологических загрязнений механической протиркой может сопровождаться царапинами. Недостаток бесконтактной очисткой – низкая эффективность растворителей и нестабильность их свойств при хранении и использовании. Диагностирование порога оптического пробоя, ресурса эксплуатации зеркал и прочности, нанесённых на них покрытий позволила найти азеотропные смеси более эффективных растворителей, исследованы и предложены способы стабилизации их физико-химических свойств. Показана целесообразность использования для очистки металлооптики азеотропных смесей на основе «галогензамещенный углеводород – ацетон (2-бутанон) – этанол» как наиболее эффективной моющей среды, сохраняющей стабильность свойств и обеспечивающей максимальное и быстрое удаление примесей без повреждения поверхности.

## ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ ИЗ ПЛАТИНОВОГО СПЛАВА

Логинов Ю.Н.<sup>1</sup>, Первухин А.Е.<sup>1</sup>, Бабайлов Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»,  
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,

e-mail: [j.loginov@urfu.ru](mailto:j.loginov@urfu.ru)

<sup>2</sup>ФБУН Институт машиноведения УрО РАН, д.34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург,  
620049, Российская Федерация

Методами электронной микроскопии и микроспектрального анализа выявлена форма и химический состав частиц, загрязняющих поверхность проволоки из платинового сплава Pt<sub>92,5</sub>Pd<sub>4</sub>Rh<sub>3,5</sub>. В работе выполнено исследование поверхности проволоки методами электронной микроскопии и микроспектрального анализа, был использован электронный растровый микроскоп Philips XL-30 с микрорентгеноспектральным анализатором. Обнаружено явление возникновения у частиц включений пор, вытянутых вдоль направления волочения. На основе метода конечных элементов разработана математическая модель и решена задача расчета напряженно-деформированного состояния процесса волочения.

По результатам решения показано, что возникновение дополнительных дефектов связано с соотношением напряжений в схеме обработки металла методом волочения. При расчете был перебран ряд вариантов соотношений осевых и ортогональных им напряжений. Выявлено, что при наличии напряжений одного знака – сжатия – поры могут не возникать.

Процесс волочения проволоки из платинового сплава Pt<sub>92,5</sub>Pd<sub>4</sub>Rh<sub>3,5</sub> сопровождается видоизменением поверхностных дефектов. Дополнительно к твердым частицам включений добавляются поры, вытянутые вдоль направления волочения. Расчеты показывают, что увеличение размера пор зависит от соотношения осевых и ортогональных им напряжений.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 01201375904, а также при финансовой поддержке по Постановлению № 211 Правительства Российской Федерации (контракт № 02.А03.21.0006).*

### Литература

1. Loginov Y.N., Demakov S.L., Illarionov A.G. et al. Evolution of defects in the production of capillary copper tubes // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 224. – P. 80–88.
2. Loginov Y.N., Demakov S.L., Illarionov A.G. et al. Interaction of a copper oxide particle with copper in drawing // Russian Metallurgy (Metally). – 2012 (11). – P. 947–953.
3. Логинов Ю. Н., Демаков С. Л., Илларионов А. Г. и др. Возникновение пористых структур в кислородсодержащей меди при деформационном воздействии // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 1, № 6. – С. 99–102.
4. Loginov Y.N., Fomin A.A. Deformation resistance of platinum alloy Pt<sub>81</sub>Pd<sub>15</sub>Rh<sub>3.5</sub>Ru<sub>0.5</sub> // Tsvetnye Metally. – 2015. – Vol. 12. – P. 80–83.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ЯЧЕИСТОГО ТИТАНОВОГО ИМПЛАНТАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МКЭ-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Логинов Ю.Н., Голоднов А.И., Степанов С.И.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,  
e-mail: [j.n.loginov@urfu.ru](mailto:j.n.loginov@urfu.ru)

В последнее время в качестве универсального подхода изготовления пористых титановых имплантатов для применения в хирургии выдвигаются на передний план аддитивные технологии [1]. Они позволяют изготовить объект с заранее проектируемой структурой, внутренней и внешней архитектурой. Важным параметром имплантата является модуль упругости, который подбирается, исходя из представлений об оптимальном соотношении прочности и жесткости конструкции [2]. Для определения модуля упругости используют экспериментальные приемы и расчетные методы, основанные на учете фазового состава [3], текстуры [4] и архитектуры пор.

Цель исследования – определение модуля упругости ячеистого титанового имплантата на основе расчетов, выполненных методом конечных элементов.

Для проведения расчетов была построена 3D модель элементарной ячейки в программном пакете Solid Works. В качестве модельного материала в расчетах использовали титановый сплав Ti–6Al–4V. Элементарная ячейка, образующая структуру имплантата, представляет собой пресечение трех цилиндров диаметром  $1,2 \times 10^{-3}$  м и длиной  $2,1 \times 10^{-3}$  м. Выполненные расчеты показали, что достигаемая при этом относительная пористость составляет 49,5 %. Нагружение при сжатии моделировали методом конечных элементов в модуле Mechanical Structure комплекса программ ANSYS. Сформулировали необходимые граничные условия и реализовали процедуру расчета.

В результате расчета получили распределение характеристик деформированного и напряженного состояния. Определили перемещение, создаваемое наперед заданной нагрузкой, что позволило оценить уровень модуля упругости. Для рассматриваемой геометрии имплантата модуль упругости оказался равным 34,5 ГПа, что составляет 30 % от модуля упругости компактного титанового сплава. Дополнительная оценка сделана по возможному расположению опасных сечений в ячеистой структуре. Выявлено, что наибольшие деформации локализованы в зонах примыкания цилиндров, поэтому сделано предположение о возможности оптимизации геометрии в указанных зонах.

Выводы. Оценка упругих свойств ячеистых структур имплантатов медицинского назначения возможна с применением вычислительных процедур метода конечных элементов. В выполненной работе удалось создать ячеистую структуру имплантата с понижением модуля упругости более чем в три раза по отношению к компактному титановому сплаву.

### Литература

1. Porous Ti6Al4V alloys with enhanced normalized fatigue strength for biomedical applications / Li Fuping, Li Jinshan, Kou Hongchao, Zhou Lian // Materials Science and Engineering: C. – 2016. – Vol. 60. – P. 485–488.
2. Tsukrov I., Novak J. Effective elastic properties of solids with defects of irregular shapes // International Journal of Solids and Structures. – 2002. – Vol. 39. – P. 1539–1555.
3. Development and investigation of the structure and physical and mechanical properties of low-modulus Ti–Zr–Nb alloys / S. V. Grib, A. G. Illarionov, A. A. Popov, O. M. Ivasishin // The Physics of Metals and Metallography. – 2014. – Vol. 115, iss. 6. – P. 600–608.
4. Unusual Young's modulus behavior in ultrafine-grained and microcrystalline copper wires caused by texture changes during processing and annealing / P. P. Pal-Val, Yu. Loginov, S. L. Demakov, A. G. Illarionov, V. D. Natsik, L. N. Pal-Val, A. A. Davydenko, A. P. Rybalko // Materials Science and Engineering A. – 2014. – Vol. 618. – P. 9–15.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Дмитриев С.Ф.<sup>1</sup>, Ишков А.В.<sup>2</sup>, Катасонов А.О.<sup>1</sup>, Маликов В.Н.<sup>1,\*</sup>, Сагалаков А.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет, 61, Ленина, Барнаул, 656054, Россия,  
e-mail: [osys11@gmail.com](mailto:osys11@gmail.com)

<sup>2</sup>Алтайский государственный аграрный университет,  
98, Красноармейский, Барнаул, 656054, Россия

Актуальной проблемой неразрушающего контроля в современном машиностроении является определение качества сварных швов титановых сплавов. Использование вихретоковой дефектоскопии для оценки качества сварных швов титановых сплавов представляется актуальной задачей. Так как вихретоковый метод контроля нечувствителен к непроводящим слоям краски, то его можно использовать для диагностики деталей с лакокрасочными покрытиями. Использование современных вихретоковых преобразователей дает возможность определять качество сварного шва с высокой степенью точности. Эксперименты, проведенные в рамках этого исследования, показали возможность оценки однородности материала сварного шва.

Разработан сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь (ВТП) [1] для локального контроля физических параметров при исследовании свойств пластин из титановых сплавов и сварных швов. Достоинством данного преобразователя является возможность, в отличие от аналогичных приборов, проводить локальные измерения на участках величиной порядка сотен микрометров и на глубинах порядка 5 мм. Непосредственно измеряемым параметром является электрическая проводимость материала и ее распределение по поверхности и толщине исследуемого объекта.

Характеристики разработанных преобразователей позволяют эффективно локализовать магнитное поле для контроля дефектов от 250 мкм и обеспечивать значительную глубину его проникновения в исследуемый объект при работе на достаточно низких частотах [1].

Разработка ПО осуществлялась на языке C++ под операционные системы Windows. Используя микшерную подсистему Windows, ПО управляет подачей напряжения на возбуждающую обмотку преобразователя, задавая значение амплитуды и частоты синусоидального цифрового сигнала виртуального генератора.

Измерения производились на образцах, представляющих титановые пластины VT1-0, соединенные с помощью сварных швов. Толщина пластин составляла 5 мм. Ширина сварного шва составляла 5 мм. Перед началом измерений производилась калибровка датчика, заключающаяся в определении вносимого напряжения с участка, свободного от дефектов.

Сканирование осуществлялось поперек сварного шва. Результаты эксперимента представлены на рис. 1 и 2. В данном образце влияние некачественного сварного шва на вносимое напряжение явно прослеживается по значительному падению амплитуды сигнала в области сварного шва по сравнению с областью пластин.

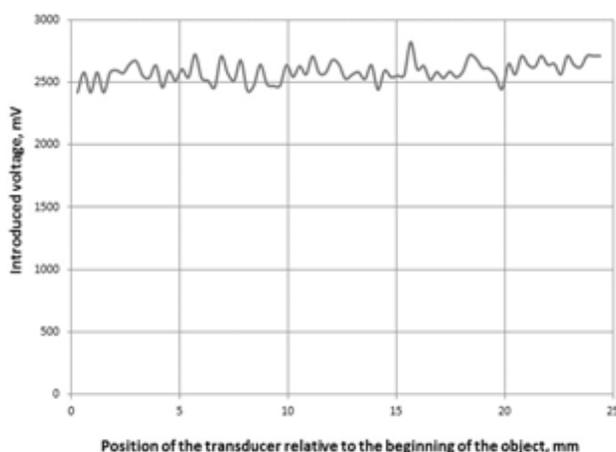


Рис. 1. Величина вносимого напряжения на измерительную обмотку преобразователя при сканировании поперек сварного шва образца № 1

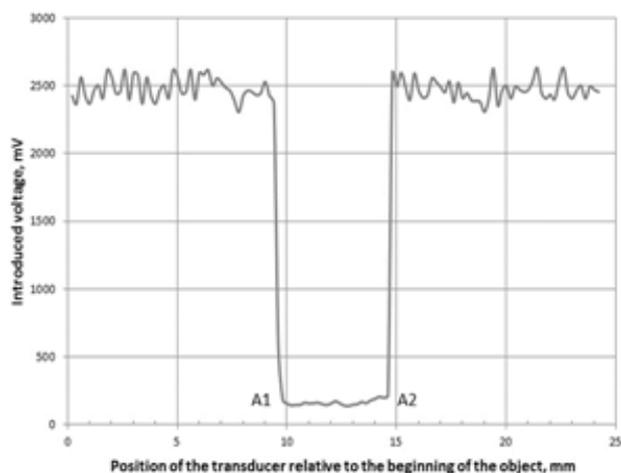


Рис. 2. Величина вносимого напряжения на измерительную обмотку преобразователя при сканировании поперек сварного шва образца № 2

На основании проведенного эксперимента сделан вывод о низком качестве сварного шва образца № 1. Низкое качество сварки было подтверждено и непосредственно при разрезании сварного шва. Сканирование образца № 2 показало отсутствие отклонений амплитуды сигнала в пределах сварного шва. Разрезание сварного шва образца № 2 показало высокое качество сварки.

Результаты проведенных экспериментов показали высокую эффективность разработанного метода для поиска дефектов в сварных швах титановых пластин и оценки качества сварки. Благодаря изменению амплитуды сигнала вихретокового преобразователя в области сварного шва удалось точно установить границы сварного шва, а его низкое качество хорошо заметно за счет резкого падения амплитуды сигнала. Аналогично, зависимость, полученная в результате сканирования второго образца с высоким качеством сварки, показала отсутствие существенных изменений амплитуды сигнала.

#### Литература

1. Дефектоскопия сплавов методом вихревых токов / С. Ф. Дмитриев, А. О. Катасонов, В. Н. Маликов, А. М. Сагалаков // Дефектоскопия. – 2016. – № 1. – С. 41–47.

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ПАКЕТОВ ПРОВОЛОК

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

*ИИМАШ УрО РАН, д. 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия,*

*e-mail: [us@imach.uran.ru](mailto:us@imach.uran.ru)*

Оценка состояния канатов подъемно-транспортного оборудования, в частности, определение степени износа канатов (потери сечения), а также текущего уровня механических свойств отдельных проволок, составляющих канат, является важной задачей неразрушающего контроля.

Одним из вариантов диагностики таких объектов может служить магнитный дифференциальный метод, основанный на измерении разности магнитных потоков, создаваемых в испытуемом и стандартном изделиях.

С целью определения возможностей использования магнитных методов для оценки эксплуатационных характеристик стальных канатов были выполнены исследования на образцах в виде пакетов проволок, моделирующих потерю сечения из-за износа и обрыва отдельных проволок, а также изменение структурного состояния проволок в случае работы канатов при повышенных температурах.

В качестве преобразователя использовали дифференциальный Н-образный электромагнит с симметричным ярмом из трансформаторной стали. Четыре намагничивающие обмотки, расположенные на обеих половинах ярма, позволяли создать магнитный поток одного направления. В отверстиях полюсов электромагнита были вмонтированы медные трубки, в которые помещали стандартный и испытуемый образцы. На средней перемычке Н-образного ярма электромагнита была расположена измерительная обмотка. По сигналу, поступающему с этой измерительной обмотки, определяли разность потоков испытуемого и стандартного образцов. При одинаковых геометрических размерах и одинаковом структурном состоянии испытуемого и стандартного образцов, а также при абсолютной симметрии обеих половин ярма и отсутствии значительных различий в потоках рассеивания, магнитные потоки в обеих половинах ярма должны быть одинаковыми, а их разница в средней перемычке равна нулю. При соблюдении симметрии магнитной цепи отклонение разности потоков в ту или иную сторону будет отвечать большему или меньшему магнитному потоку испытуемого образца по отношению к стандартному образцу. Кроме того, измеряли сигнал с обмоток, размещенных непосредственно на стандартном и испытуемом образцах. Намагничивающие и измерительные обмотки подключали к магнитно-измерительному комплексу МИК-1.

Потерю сечения канатов в результате истирания моделировали, уменьшая в испытуемом пакете количество стальных проволок и замещая их медными такого же диаметра, так что общее сечение испытуемого пакета оставалось неизменным.

Потерю сечения каната из-за разрыва его отдельных проволок имитировали, заменяя цельную проволоку в испытуемом пакете двумя с расстоянием между ними около 5 мм. Количество разорванных проволок варьировали от 1 до 17.

Изменение структурного состояния проволок моделировали, komponуя испытуемый образец проволоками, имеющими меньшую коэрцитивную силу.

Показано, что индукция насыщения линейно уменьшается с уменьшением сечения каната, как вследствие его истирания, так и по причине разрыва отдельных проволок, что дает возможность использовать данный параметр для решения задач оценки степени износа канатов.

Коэрцитивная сила испытуемого каната или сравнение магнитных потоков в испытуемом канате и стандартном образце, в поле, равном коэрцитивной силе стандартного образца, могут служить информативными параметрами для определения изменений структурного состояния металла стального каната.

## СВОЙСТВА БРИКЕТОВ ИЗ КОКСОВОЙ МЕЛОЧИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ШТЕМПЕЛЬНОМ БРИКЕТИРОВАНИИ

Логинов Ю.Н.<sup>1</sup>, Бабайлов Н.А.<sup>2</sup>, Полянский Л.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,

e-mail: [j.loginov@urfu.ru](mailto:j.loginov@urfu.ru)

<sup>2</sup>ФБУН Институт машиноведения УрО РАН,

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

<sup>3</sup>ЗАО «Спайдермаш», д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

В работе приведены результаты штемпельного прессования (брикетирования) в закрытой цилиндрической пресс-форме брикетов из коксовой мелочи со связующим. В качестве связующего использовано жидкое стекло. На основе экспериментальных данных построены аппроксимирующие кривые для зависимости коэффициент уплотнения – напряжение прессования, определены механические свойства брикетов: прочность на сбрасывание и раздавливание. Результаты представлены в виде аппроксимирующих зависимостей в виде степенной функции.

В технологии производства товарного кокса для черной металлургии возникают отходы в виде коксовой мелочи и пыли. Выход коксовой мелочи на производстве составляет до 5÷7 %. На пути применения этих отходов непосредственно в пирометаллургии стоит проблема выноса конвективными потоками легких частиц из печного пространства. Однако существует универсальный рецепт решения технической задачи, который заключается в укрупнении частиц до приемлемого размера с использованием тех или иных методов окомкования, среди которых важное место занимает способ брикетирования.

Авторами выполнены исследования по штемпельному и валковому прессованию (брикетированию) коксовой мелочи с целью подбора параметров подготовки шихты к брикетированию и собственно брикетирования. Эксперименты выполнены в лаборатории кафедры обработки металлов давлением Уральского федерального университета на универсальной испытательной машине УИМ-30 номинальным усилием 300 кН в закрытой цилиндрической пресс-форме методом одностороннего сжатия. В работе были определены кривые уплотнения при брикетировании подготовленной шихты в составе коксовая мелочь со связующим 5,0; 7,5 и 10,0 % жидкого стекла.

Выполненные в работе эксперименты по компактированию коксовой мелочи создают возможность выполнить расчеты по проектированию технологии и оборудования под реальный объем производства технологической линии. Утилизация отходов коксового производства позволяет ввести в промышленный оборот дополнительный источник энергии.

### Литература

1. Механика валкового брикетирования сыпучих материалов / Ю. Н. Логинов, С. П. Буркин, Н. А. Бабайлов, Л. И. Полянский. – Екатеринбург : АМБ, 2011. – 304 с.
2. Loginov Y. N., Bourkine S. P., Babailov N. A. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 118, nos. 1–3. – P. 151–157.
3. Yu. N. Loginov, N. A. Babailov, D. N. Pervukhina, Physical modeling of roll pressing at asymmetric effect on the sealing material // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya. – 2015. – Vol. 58, no. 3. – P. 186–191.
4. Industrial recycling of technogenic wastes and mineral ore processing / L. I. Polyanskiy, N. A. Babailov, Yu. N. Loginov, D. N. Pervukhina // AIP Conf. Proc. – 2016. – Iss. 1785. – P. 040046.

## **ЗАВИСИМОСТЬ СРЕДНЕЙ НАРАБОТКИ УЗЛА ГИДРОПЯТЫ ДО ОТКАЗА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ ДЛЯ СЕКЦИОННЫХ НАСОСОВ АК «АЛРОСА»**

Овчинников Н.П., Портнягина В.В., Собакина М.П.

*Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова,  
д. 18, ул. Беллинского, Якутск, 677000, Россия,  
e-mail: vick\_i@mail.ru*

Длительный опыт эксплуатации секционных насосов, смонтированных в подземных кимберлитовых рудниках «Удачный», «Мир» и «Интер» АК «АЛРОСА», свидетельствует, что их отличительной чертой является низкий фактический средний ресурс до капитального ремонта, варьирующийся в диапазоне 1334,2...6860 ч. Ежегодно на производство капитальных ремонтов секционных насосов вышеуказанных рудников суммарно затрачиваются десятки миллионов рублей. В связи с постоянным сокращением денежных средств на эксплуатацию оборудования констатируем, что повышение межремонтных периодов работы секционных насосов является одной из приоритетных задач для руководства Удачинского и Мирнинского ГОКов.

Обработанный представительный статистический материал показал, что в условиях подземных кимберлитовых рудников «Удачный», «Интер» и «Мир» число произведенных капитальных ремонтов секционных насосов сильно коррелирует с числом отказов узла гидропьяты. Стоит отметить, что выход из строя узла гидропьяты обычно связан с его гидроабразивным истиранием, интенсивность которого зависит от ряда факторов.

Экспериментально установленная закономерность объясняется тем, что ухудшение технического состояния узла гидропьяты сопровождается ростом осевого смещения ротора насоса, вследствие чего, его роторные детали начинают задевать корпусные.

Последствием такого механического контакта является преждевременный выход из строя базовых деталей, что является серьезным основанием для производства капитального ремонта насоса.

Кроме того факта, что долговечность узла гидропьяты определяет частоту проведения капитальных ремонтов секционных насосов подземных кимберлитовых рудников, данный узел с точки зрения безотказности является наименее надежным элементом в конструкции этих насосов.

Как видно, одним из условий повышения эффективности эксплуатации секционных насосов, смонтированных в подземных кимберлитовых рудниках «Удачный», «Мир» и «Интер» АК «АЛРОСА», является повышение долговечности их узла гидропьяты.

Резюмируя все вышесказанное, констатируем, что установление с помощью корреляционно-регрессионного анализа наиболее значимых факторов, влияющих на среднюю наработку узла гидропьяты до отказа секционных насосов, является актуальной научно-практической задачей.

В результате выполненных исследований установлены 4 фактора, которые в большей степени влияют на среднюю наработку узла гидропьяты до отказа в условиях подземных кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА». Кроме этого, получена многофакторная линейная зависимость средней наработки узла гидропьяты до отказа от различных факторов для секционных насосов подземных кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА», которая позволяет в перспективе прогнозировать долговечность наименее надежного конструкционного элемента секционного насоса.

# ОЦЕНКА КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВДАВЛИВАНИИ ЖЕСТКОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ШТАМПА С ПЛОСКОЙ ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ПЛАСТИНУ ИЗ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Саврай Р.А., Кузнецов А.В.

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

Классическое теоретическое решение краевой задачи свидетельствует о том, что значения напряжения по границе зоны взаимодействия будут стремиться к бесконечности [1]. Например, при вдавливании жесткого цилиндрического штампа с плоской торцевой поверхностью в упругую пластину, распределение нормальных контактных напряжений  $\sigma_{zz}$  под штампом может быть рассчитано по формуле [2]:

$$\sigma_{zz}(\rho, 0) = -\frac{2GD}{\pi(1-\mu)}(r^2 - \rho^2)^{-1/2}, \quad 0 \leq \rho < r,$$

где  $G = E/2(1 + \mu)$  – модуль упругости при сдвиге;  $D$  – глубина вдавливания;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости;  $r$  – радиус цилиндра.

Анализ данной зависимости показывает, что на краях цилиндра контактные напряжения выше, чем в его середине, а при  $\rho = r$  контактные напряжения стремятся к бесконечности. Очевидно, что практическое распределение контактных напряжений вследствие релаксации будет отличаться от теоретического. Кроме того, в случае упругопластического нагружения деформация материала под поверхностью штампа должна приводить к дополнительному перераспределению напряжений. Таким образом, цель настоящей работы – расчет нормальных контактных напряжений  $\sigma_{zz}$  при вдавливании жесткого цилиндрического штампа с плоской торцевой поверхностью в пластину из упругопластического материала с использованием метода конечных элементов. Необходимо отметить, что, с одной стороны, эта задача может быть решена как объемное контактное взаимодействие двух тел, но для такого решения требуется более детальная проработка поверхности тел взаимодействия. С другой стороны, можно упростить задачу, полагая, что цилиндрический штамп по прочности значительно превосходит материал пластины. В данном случае, для получения решения достаточно задать область взаимодействия штампа и пластины на этапе построения геометрической модели. Поэтому поставленная задача решалась для упругопластической пластины при расчете без учета и с учетом контактного взаимодействия.

В результате расчета показано соответствие распределения нормальных контактных напряжений на поверхности пластины для обоих рассмотренных случаев, а максимальные напряжения возникают на границе области взаимодействия штампа и пластины и имеют близкие значения. При этом соотношение нормальных контактных напряжений на границе и в центре области взаимодействия штампа и пластины при используемых граничных условиях составило 1,8 раза при расчете как без учета, так и с учетом контактного взаимодействия. Следовательно, упрощенный расчет без учета контактного взаимодействия позволяет качественно и количественно оценить распределение нормальных контактных напряжений на поверхности пластины и может быть использован для оценки контактных напряжений при вдавливании жесткого цилиндрического штампа с плоской торцевой поверхностью в пластину из упругопластического материала.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-06754\_a.*

## Литература

1. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М. : Мир, 1989. – 510 с.
2. Sneddon I.N. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile // Int. J. Eng. Sci. – 1965. – Vol. 3, iss. 1. – P. 47–57.

# УСТОЙЧИВОСТЬ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Семенов А.А.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),  
4, 2-я Красноармейская ул., Санкт-Петербург, 190005, Россия,  
e-mail: [sw.semenov@gmail.com](mailto:sw.semenov@gmail.com)*

Динамическое нагружение оказывает существенное влияние на ресурс и работоспособность конструкций [1–4]. В частности, для тонкостенных оболочечных конструкций, применяемых в авиастроении, строительстве и других областях промышленности, динамическое нагружение может привести к потере устойчивости (существенному резкому увеличению прогиба при малом изменении прикладываемой нагрузки). Часто это приводит к резкому возрастанию напряжений в материале оболочки и возникновению необратимых изменений (появлению микротрещин и деформаций текучести). Процесс деформирования оболочечных конструкций из современных ортотропных материалов, подверженных динамическому нагружению, пока изучен недостаточно.

Цель данной работы – анализ устойчивости некоторых вариантов оболочечных конструкций, выполненных из современных ортотропных материалов, при динамическом нагружении.

Рассмотрим ортотропные цилиндрические панели, шарнирно-неподвижно закрепленные по контуру. Внешняя поперечная нагрузка, действующая на конструкцию, является равномерно распределенной и линейно зависит от времени.

Используем геометрически нелинейный вариант модели, также учитывающий ортотропию материала и поперечные сдвиги (модель типа Тимошенко).

Алгоритм исследования математической модели строится на основе методов Л.В. Канторовича (для сведения системы дифференциальных уравнений для функций трех переменных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) относительно функций только одной переменной  $t$ ) и метода Розенброка (для численного решения жестких систем ОДУ). Критерием потери устойчивости оболочки при динамическом нагружении является нагрузка точки перегиба графика «нагрузка – прогиб».

Рассмотрим панели цилиндрических оболочек протяженностью  $a = 150h$ , углом разворота  $b = 0,4$  рад, радиусом  $R = 250h$  и толщиной  $h = 0,01$  м при скорости нагружения  $A_1 = 1$  МПа/с. Направление оси ортотропии 2 совпадает с направлением образующей цилиндрической панели (ось  $x$ ).

Рассматриваемые панели выполнены из ортотропных материалов: E-Glass/Эпоху [4], AS/3501 Graphite/Эпоху [4], стеклопластик Т-10/УПЭ22-27 [5], углепластик М60J [6], а также изотропных – стали и оргстекла.

Был проведен анализ устойчивости некоторых вариантов цилиндрических ортотропных панелей, выполненных из современных ортотропных материалов, при динамическом нагружении.

Использование современных ортотропных материалов (углепластик, стеклопластик и др.) дает существенное преимущество при проектировании оболочечных конструкций. Следует отметить, что для конструкций из некоторых ортотропных материалов возможно уменьшение значения критической нагрузки по сравнению с «традиционными» изотропными, однако такие конструкции существенно легче, чем конструкции, выполненные из традиционных изотропных материалов (например стали).

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, проект № 9.5605.2017/8.9.*

## Литература

- 1 Sirivolu D., Hoo Fatt M.S. Dynamic stability of double-curvature composite shells under external blast // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2015. – Vol. 77. – P. 281–290. – DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2015.09.005.
- 2 Bich D.H., Dung D.V., Nam V. H. Nonlinear dynamical analysis of eccentrically stiffened functionally graded cylindrical panels // *Composite Structures*. – 2012. – Vol. 94, no. 8. – P. 2465–2473. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.03.012.
- 3 Less H., Abramovich H. Dynamic buckling of a laminated composite stringer–stiffened cylindrical panel // *Composites Part B: Engineering*. – 2012. – Vol. 43, № 5. – P. 2348–2358. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.11.070.
- 4 Ungbhakorn V., Singhatanadgid P.A. Scaling Law for Vibration Response of Laminated Doubly Curved Shallow Shells by Energy Approach // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2009. – Vol. 16, no. 5. – P. 333–344. – DOI: 10.1080/15376490902970430.
- 5 Тышкевич В. Н. Выбор критериев прочности для труб из армированных пластиков // *Известия ВолгГТУ*. – 2011. – № 5 (78). – С. 76–79.
- 6 Смердов А. А., Буянов И. А., Чуднов И. В. Анализ оптимальных сочетаний требований к разрабатываемым углепластикам для крупногабаритных ракетно-космических конструкций // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2012. – № 8. – С. 70–77.

## РАЗРУШЕНИЕ НАНОЦЕПОЧЕК ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Стружанов В.В.<sup>1</sup>, Коркин А.В.<sup>2</sup>

*Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия,  
e-mail: <sup>1</sup>[STRU@IMACH.URAN.RU](mailto:STRU@IMACH.URAN.RU), <sup>2</sup>[ALEXKORKIN@LIST.RU](mailto:ALEXKORKIN@LIST.RU)*

Наноструктурные материалы представляют собой композиты, в которых наноэлементы разделены матричной прослойкой, также имеющей наноразмеры. При моделировании таких материалов, как правило, наноэлементы можно считать абсолютно жесткими, т. е. деформирование происходит только за счёт изменения расстояния между наноэлементами и возможна физическая дискретизация среды, заключающаяся в замене действия прослойки на наноэлементы центральными силами. При этом в силу различия объёмов прослоек, разделяющих наноэлементы, данные центральные силы также будут различны. Полагается, что диаграмма усилий при растяжении произвольных двух наноэлементов имеет восходящую и ниспадающую до нуля ветви. На восходящей ветви процесс растяжения устойчив, на ниспадающей – неустойчив.

Вместо отдельных наноэлементов композит может содержать и целые их совокупности в виде наноцепочек. Цель настоящей работы – построение методики определения момента разрушения наноцепочек при растяжении, который связан с моментом потери устойчивости процесса.

Исследование устойчивости растяжения рассматриваемых наносистем осуществляется следующим образом. Для каждой системы выписывается потенциальная функция, характеризующая её состояние. Тип равновесия определяет матрица Гессе этой функции. Переход из состояния устойчивого равновесия в состояние неустойчивости происходит в момент, когда детерминант матрицы Гессе обращается в нуль. Для каждой системы построены дискриминантные конусы матрицы Гессе, разделяющие пространство, параметризованное компонентами матрицы Гессе, на области устойчивости и неустойчивости. Процесс растяжения представляется движением изображающей точки в указанном пространстве. Сначала изображающая точка располагается внутри дискриминантного конуса и процесс растяжения устойчив. Потеря устойчивости процесса, а следовательно, разрушение наноструктуры происходит тогда, когда изображающая точка пересекает коническую поверхность.

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛОМАТРИЧНОМ КОМПОЗИТЕ В95/10 % SiC В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Белозеров Г.А.<sup>1</sup>, Смирнов А.С.<sup>1</sup>, Коновалов А.В.<sup>1</sup>, Муйземнек О.Ю.<sup>2</sup>, Перминова А.В.

<sup>1</sup>Институт машиноведения УрО РАН, Комсомольская 34, Екатеринбург

<sup>2</sup>УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Мира 19, Екатеринбург, 620049, Россия,

e-mail: [george@imach.uran.ru](mailto:george@imach.uran.ru)

Металлические композиционные материалы на основе алюминиевой матрицы нашли свое применение в аэрокосмической технике в качестве заменителя алюминиевых сплавов в конструкциях, где нужны более высокие прочностные характеристики и долговечность эксплуатации по сравнению с конструкциями, изготовленными из алюминиевых сплавов. Проектирование новых технологий изготовления заготовок и изделий (особенно из композитов), а также исследование влияния термомеханического воздействия на физико-механические свойства материалов целесообразно проводить с использованием компьютерного моделирования. Для компьютерного моделирования необходимо, чтобы математическая модель сопротивления деформации композита корректно описывала реологическое поведение композита в предполагаемом температурно-скоростном диапазоне деформаций. Для этого необходимо, чтобы модель учитывала внутреннюю структуру материала и проходящие в нем физические процессы упрочнения и разупрочнения в явном виде. В связи с этим для построения и верификации модели сопротивления деформации необходимы экспериментальные данные не только по влиянию температурно-скоростных условий деформирования на сопротивление деформации, но и их влияние на формирование микроструктуры.

Цель работы заключалась в исследовании влияния скорости деформации на формирование зерен и малоугловых границ в алюмоматричном композите В95\10 % SiC при температуре 500 °С.

Исследование влияния скорости деформации на реологическое поведение и формирование микроструктуры проводили на основе опытов по сжатию цилиндрических образцов. Скорость деформации в эксперименте лежала в диапазоне 0,1–5,5 с<sup>-1</sup>. Определение параметров микроструктуры, таких как средний диаметр зерен и плотность малоугловых границ, выполняли с использованием результатов, полученных с помощью метода дифракции отраженных электронов (ДОЭ) на растровом электронном микроскопе VEGA II XMU с приставкой OXFORD HKLNordlysF<sup>+</sup>. Анализ микроструктуры проводили на образцах, которые были охлаждены после деформации до температуры, близкой к комнатной, в течение 2 с.

С использованием анализа методом ДОЭ было установлено, что в процессе пластической деформации в исследуемом композите при температуре 500 °С во всем диапазоне скоростей деформаций 0,1–5,5 с<sup>-1</sup> происходит *in situ* рекристаллизация, сопровождаемая уменьшением среднего диаметра зерен и увеличением плотности малоугловых границ в сравнении с состоянием перед деформацией. С увеличением скорости деформации средний диаметр зерен уменьшается, а плотность малоугловых границ увеличивается. Объяснением данного результата является рост плотности дислокаций с увеличением скорости деформации, что приводит к увеличению количества субзерен на начальной стадии *in situ* рекристаллизации. С увеличением деформации субзерна растут и увеличивают свою разориентацию относительно соседних субзерен. При разориентации выше 15 °С субзерна становятся зернами.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 14-19-01358.*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНОАКТИВАЦИИ И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Петрова П.Н., Гоголева О.В., Майер А.Ф.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, ул. Автоторожная, 20, г. Якутск, 677007, Россия,  
e-mail: [ppavlina@yandex.ru](mailto:ppavlina@yandex.ru)

В работе рассматривается влияние ультразвуковых колебаний (УЗ) на свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и совместной механоактивации базальтового волокна с СВМПЭ на износостойкость и деформационно-прочностные свойства композитов. Показано повышение всех физико-механических показателей (предела прочности при разрыве, относительного удлинения) до 17–18 % и модуля упругости до 28 %, износостойкости СВМПЭ в 2 раза по сравнению с необработанным ультразвуком СВМПЭ. Установлено, что оптимальное время воздействия УЗ СВМПЭ соответствует 40 мин (таблица).

Физико-механические и триботехнические свойства СВМПЭ

Образец	Время воздействия УЗ, мин	Предел прочности при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, МПа	Модуль упругости, МПа	Скорость массового изнашивания, мг/ч
СВМПЭ	–	39	356	765	0,49
СВМПЭ	10	39	393	886	–
СВМПЭ	20	43	371	924	–
СВМПЭ	30	44	375	984	0,25
СВМПЭ	40	46	408	983	0,19
СВМПЭ	50	41	406	878	–
СВМПЭ	60	44	377	969	–

Технология получения полимерного материала на основе СВМПЭ с использованием ультразвука позволяет получить материалы с улучшенным комплексом свойств без использования наполнителей и усложнения технологического процесса. При этом исключается процесс подготовки наполнителя, включающий сушку, просеивание, диспергирование, а также процесс смешения наполнителя с полимером.

Для сравнения разработаны полимерные композиты на основе СВМПЭ и базальтового волокна с использованием технологии совместной механоактивации компонентов в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 5 для улучшения совмещения волокна с полимерной матрицей. Установлено, что при повышении концентрации базальтового волокна до 5 мас. % деформационно-прочностные характеристики несколько снижаются, при этом износостойкость повышается в 3–5 раз, а модуль упругости композитов – в 1,5 раза.

Таким образом, показано, что использование УЗ позволяет реализовать комплексное повышение показателей служебных характеристик СВМПЭ (прочности, эластичности и износостойкости) без использования наполнителей, тогда как введение в СВМПЭ базальтовых волокон с использованием технологии совместной механоактивации приводит только к повышению износостойкости и модуля упругости полимерных композитов.

## ИСТОЧНИКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Буренина О. Н., Саввинова М.Е.

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, 1, Октябрьская, Якутск, 677890, Россия,  
e-mail: [maria-svv@yandex.ru](mailto:maria-svv@yandex.ru)*

Целью работы – анализ текущего состояния промышленности строительных материалов Республики Саха (Якутия).

Реализация крупных инвестиционных проектов и строительство объектов капитального строительства в рамках Государственных программ Республики Саха (Якутия) требует большого объема бетонных смесей и строительных растворов. Одними из основных компонентов этих смесей являются нерудные строительные материалы – крупный и мелкий заполнитель. Республика располагает огромными запасами кварцевых песков. Кварцевые пески Бестяхского, Нижне-Бестяхского месторождений и месторождения Диригинг-Етеге пригодны для производства силикатобетонных изделий, в том числе из автоклавного ячеистого бетона. В общем на территории Якутии подготовлены к промышленному освоению 17 месторождений песков с суммарным балансовым запасом по категории А + В + С1 в количестве 47530 тыс. м<sup>3</sup>. Однако утвержденные запасы песка в южных и западных улусах Якутии недостаточны, поэтому перспективно создание на этих территориях завода по выпуску щебня и песка из отсевов дробления, тем более что сырьевые запасы для этого производства распространены практически повсеместно.

Для реализации мероприятий социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) приоритетными направлениями развития производства строительных материалов на основе бетонных смесей видятся следующие:

- увеличение объема производства низкомарочных бетонов и изделий на их основе для малоэтажного домостроения;
- организация производства стеновых мелких блоков из высокопрочных энергоэффективных бетонов, дислоцированных по всей территории РС (Я);
- широкомасштабное использование местной минерально-сырьевой базы и отходов потребления и производства для изготовления высокопрочных и энергоэффективных материалов;
- создание новых либо расширение существующих производств сборных железобетонных изделий для строительства жилья эконом-класса и объектов социально-культурного назначения;
- для уменьшения транспортной составляющей в стоимости строительства целесообразно размещение мобильных производств строительных материалов малой производительности во всех группах улусов, при этом создаваемые производства должны отвечать требованиям энергоэффективности и экологичности, быть легко переналаживаемыми, иметь возможность производства широкой номенклатуры изделий и конструкций;
- при создании новых мощностей промышленности строительных материалов использовать их максимальную приближенность к потребителю.

## ИСПЫТАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НА ДЛИТЕЛЬНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

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

*Федеральное государственное учреждение науки Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
д. 1, Октябрьская, г. Якутск, 677890, Россия,  
e-mail: [dhv4071@mail.ru](mailto:dhv4071@mail.ru)*

Сварка нагретым инструментом встык является наиболее распространенным методом соединения при строительстве газопроводов из полиэтиленовых труб за счет дешевизны и надежности получаемых сварных соединений. Сварку из полиэтиленовых труб допускается производить при температурах окружающего воздуха от  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При более низких температурах окружающего воздуха, согласно нормативным документам, сварочные работы пластмассовых труб рекомендуется проводить в отапливаемых конструкциях. Естественно, такие мероприятия, с учетом сурового климата в основной части территории Российской Федерации, значительно затормаживают строительство газопроводов из полиэтиленовых труб. В Институте проблем нефти и газа СО РАН разработаны технологии оперативной сварки полиэтиленовых труб, позволяющие производить сварочные работы при температурах окружающего воздуха ниже  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  без строительства отапливаемых конструкций на открытом воздухе. Для проверки надежности разработанных технологий необходимо провести испытания получаемых сварных соединений. Наиболее информативными являются испытания сварных соединений на длительное растяжение в среде с поверхностно активным веществом.

Цель работы – оценка качества сварных соединений полиэтиленовых труб путем испытаний на длительное растяжение при постоянной нагрузке.

При испытаниях на длительное растяжение согласно действующим нормативным документам по проектированию и строительству полиэтиленовых газопроводов сварные соединения являются годными, если образцы выдержали без разрушения 30 часов. Сварка полиэтиленовых труб ПЭ 80 SDR11 63Ч5,8 и ПЭ 100 SDR11 63Ч5,8 производилась при различных режимах и температурах окружающего воздуха от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $43,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Следует отметить, что в процессе испытаний образцы сварных соединений из ПЭ80 в основном разрушались именно по месту сплавления. В то же время сварные соединения из ПЭ100 в основном разрушались по месту, находящегося под валиками наплывов расплавленного материала (грата), т. е. в подгратовой области.

По результатам испытаний сделаны выводы, что сварные соединения из ПЭ100 имеют лучшие показатели по времени выдержки до разрушения в испытательной среде. Требуемые по нормативным документам 30 ч выдержали практически все образцы за исключением сварных соединений из ПЭ80, изготовленных сваркой при температуре окружающего воздуха  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Наиболее оптимальной температурой ОВ при сварке для ПЭ100 является температура около  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для ПЭ80 температура около  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На основе показателей времени до разрушения при испытаниях сварных соединений показана надежность разработанной в Институте проблем нефти и газа СО РАН технологии сварки полиэтиленовых труб из ПЭ80 с использованием предварительного подогрева при низких климатических температурах окружающего воздуха.

## УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ИСПЫТАНИЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОЙКОСТИ К БЫСТРОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ ТРЕЩИН В ПЭ ТРУБАХ

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

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, ул. Автодорожная 20, г. Якутск, 677007 Россия  
e-mail: [yuristan@yandex.ru](mailto:yuristan@yandex.ru), [io1982@mail.ru](mailto:io1982@mail.ru), [spira\\_ira\\_vas@mail.ru](mailto:spira_ira_vas@mail.ru)

Стойкость к быстрому растрескиванию играет определяющую роль при выборе марки материала полиэтиленового трубопровода для условий холодного климата и накладывает ограничение по допустимой нижней границе эксплуатационных температур. В основе предлагаемого метода лежит идея использования экспериментально регистрируемого явления вырождения, при понижении температуры, «рисунка губ сдвига» на поверхностях излома образцов трубных марок полиэтиленов в испытании на трещиностойкость в температурно-скоростном диапазоне. Считается установленным фактом существование температурной границы (температуры перехода,  $T_{пер}$ ), определяющей возможность распространения быстрой трещины (область  $T < T_{пер}$ ), связанной с процессом формирования так называемых «губ сдвига» на поверхностях разрушения образцов ПЭ труб. Они начинают проявляться при температуре испытаний, несколько меньшей  $T_{пер}$ . При  $T \geq T_{пер}$  губы сдвига быстро растут, приводя к торможению и остановке трещины. Методики позволяют снизить трудоемкость и технические требования к испытательному оборудованию. Произведенная в рамках разработанной методики оценка допустимой нижней температуры эксплуатации полиэтиленового газопровода показала для материалов ПЭ80 ( $T \approx -5$  °С) и ПЭ100 ( $T \approx -20$  °С).

# МЕТОД РАСЧЕТА КОНСТАНТ ПЛАСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ТЕОРИИ ХИЛЛА

Соловей В.Д., Колмогоров В.Л.

Институт машиноведения УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия,  
e-mail: [SoloveiVD@yandex.ru](mailto:SoloveiVD@yandex.ru)

Метод расчета констант пластической анизотропии для идеально пластического материала Хилла, основанный на экспериментальных данных об одноосном растяжении образцов в направлениях главных осей анизотропии, предложен в работе [1]. Образцы для растяжения имели конечные размеры, поэтому этот метод не может быть использован для расчетов констант пластической анизотропии, относящихся к малым объемам материала, из которых нельзя изготовить образцы конечных размеров. В работе [2] была решена приближенно краевая задача для процесса внедрения прямоугольного плоского индентора в полупространство, состоящее из идеально пластического анизотропного материала Хилла [1], имеющего кубическую симметрию пластических свойств и произвольную ориентацию главных осей анизотропии, определяемую углами Эйлера  $\Psi, \vartheta, \varphi$ . Отношение длинной стороны контактной поверхности индентора к короткой стороне принималось равным 7:1.

В настоящей работе при использовании решения вышеупомянутой краевой задачи предложен метод приближенного расчета констант пластической анизотропии материала Хилла  $H, \varepsilon$ , имеющего кубическую анизотропию пластических свойств, на основании экспериментальных данных о давлениях внедрения прямоугольного плоского индентора  $P_i$  различных ориентаций  $\Psi_i, \vartheta_i, \varphi_i$  ( $i \leq N; N \geq 2$ ) в исследуемый образец. Индентор имеет малую площадь контактной поверхности, поэтому предлагаемый метод может быть использован для расчета констант пластической анизотропии, относящихся к малым объемам материала.

Давление внедрения индентора  $P$  разлагается в ряд по обобщенным сферическим функциям  $T_{l,m,n}(\Psi, \vartheta, \varphi)$  с целыми индексами  $\lambda, \mu, \nu$  [3]:

$$P(H, \varepsilon; \Psi, \vartheta, \varphi) = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \sum_{\mu=-D}^D \sum_{\nu=-\lambda}^{\lambda} C_{2\lambda, 4\mu, 2\nu}(H, \varepsilon) T_{2\lambda, 4\mu, 2\nu}(\Psi, \vartheta, \varphi). \quad (1)$$

Здесь  $D$  – наибольшее целое число, содержащееся в  $\lambda/2$ .

Коэффициенты ряда (1) аппроксимируются следующим образом:

$$C_{2\lambda, 4\mu, 2\nu}(H, \varepsilon) = \sum_{p=0}^2 \sum_{q=0}^2 a_{pq}^{(\lambda, \mu, \nu)} H^{-p} \varepsilon^q. \quad (2)$$

Коэффициенты  $C_{2\lambda, 4\mu, 2\nu}(H, \varepsilon)$  в (2) вычисляются следующим образом. В пространстве переменных  $H$  и  $\varepsilon$  в интервалах  $H = (2, 0 \dots 10, 0) \times 10^{-6}$  МПа<sup>-2</sup> и  $\varepsilon = -0,6 \dots 0,6$  соответственно строится сетка узлов и выражения (1) и (2) вычисляются для этих узлов, используя решения краевой задачи [2]. Коэффициенты  $C_{2\lambda, 4\mu, 2\nu}(H, \varepsilon)$  определялись из условия наилучшей аппроксимации соотношений (1) и (2) в узлах сетки. Приводится таблица вычисленных коэффициентов  $C_{2\lambda, 4\mu, 2\nu}(H, \varepsilon)$ .

Для известных из эксперимента по внедрению индентора в испытуемый образец  $N$  наборов данных  $P_i, \psi_i, \vartheta_i, \varphi_i$  ( $i \leq N$ ) с помощью соотношений (1) и (2) формируются  $N$  нелинейных уравнений, из которых приближенно находятся искомые константы  $H$  и  $\varepsilon$ .

#### Литература

1. Хилл Р., Математическая теория пластичности [in Russian], Gostexizdat. Moscow, 1956.
2. Solovei V.D., Zhigalin A.G. The impression force of rectangular plane indenter into the plastic anisotropic half-space [in Russian], sbornik nauchnykh trudov. The treatment of metals by pressure, Ural Polytech. Inst. Publishing House, Sverdlovsk, 1978, iss. 5, pp. 27–31.
3. Vilenkin N.J. Special functions and group representation theory [in Russian], Science, Moscow, 1965.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ОПТИКИ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ВЫХОДНЫХ ОКОН

Рогожин М.В.<sup>1</sup>, Рогалин В.Е.<sup>2,3</sup>, Крымский М.И.<sup>1,2</sup>, Каплунов И.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
9, Институтский переулок, Долгопрудный, 141701, Россия

<sup>2</sup>ОАО «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»,  
95, Волоколамское ш., г. Москва, 125424, Россия

<sup>3</sup>Тверской государственный университет; 33, ул. Желябова, г. Тверь, 170100, Россия,  
e-mail: [Kaplunov.IA@tversu.rul.ru](mailto:Kaplunov.IA@tversu.rul.ru)

Рассмотрен метод повышения ресурса выходных окон высокомощных лазеров с кольцевым выводом излучения на примере СО<sub>2</sub>-лазера, работающего в мультикиловаттном диапазоне мощностей за счет использования двухкомпонентного выходного окна с непрозрачной центральной областью. Разработана математическая модель и проведены расчеты максимально допустимой мощности лазера для случаев двухкомпонентного и сплошного окон, изготовленных из ZnSe.

Ключевые слова: мощный газовый лазер, выходное окно, оптическая стойкость, неустойчивый резонатор, ZnSe.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

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

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

Остаточные напряжения, возникающие в отдельных деталях машин и элементах конструкций при изготовлении и эксплуатации, в значительной мере определяют их ресурс. В связи с этим создание и совершенствование неразрушающих методов определения остаточных напряжений является важной задачей неразрушающего контроля. Стандартами регламентируется только определение макронапряжений, и чаще всего на практике эти напряжения определяют, используя так называемый метод « $\sin^2\psi$ ». В настоящей работе на примере конструкционных закаленных сталей проведено сопоставление результатов определения остаточных напряжений методом « $\sin^2\psi$ » и методом, основанным на анализе профиля линии в зависимости от величины облучаемого объема. Показано, что при уменьшении облучаемого объема величина остаточных напряжений, определенная методом « $\sin^2\psi$ », может существенно изменяться вплоть до смены знака. Для более полной характеристики остаточных напряжений предложено, помимо определения макронапряжений по сдвигу дифракционных линий, использовать величину микронапряжений, расчет которых основан на анализе профиля линии.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ТРУБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Петухова Е.С., Гоголева О.В.

*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677890, Россия, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1,  
e-mail: [evgspar@rambler.ru](mailto:evgspar@rambler.ru)*

Задача комплексного улучшения служебных характеристик полиэтиленовых труб, в том числе для Арктических регионов, путем разработки новых композиционных материалов, обладающих улучшенными физико-механическими характеристиками, морозостойкостью и износостойкостью, является актуальным материаловедческим направлением.

В работе исследованы нанокomпозиты на основе полиэтиленов (ПЭ) марок ПЭ80Б и ПЭ2НТ11 (ОАО «Казаньоргсинтез»), содержащие в качестве наполнителей широко зарекомендовавшие себя наполнители [1–3]: нанодисперсный – синтетическая шпинель магния (Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН) [4] и нанопористый – природный цеолит Хонгурия (Кемпендяйское месторождение Республики Саха (Якутия)) [5].

Исследование физико-механических характеристик ПЭ композитов, содержащих 0,05–2,0 мас. % нанонаполнителей, показало, что их введение в состав ПЭ позволяет повысить прочность композитов при разрыве до 20 %. Также наблюдается некоторый рост модуля упругости и удлинения при разрыве. Наибольшее упрочнение материала происходит при концентрациях нанонаполнителя до 1,0 мас. %.

Поскольку трубы из ПЭ широко используются для транспортировки различных суспензий и взвесей в горнодобывающей и других отраслях промышленности, в работе была исследована износостойкость ПЭ и композитов на его основе. Установлено, что введение в ПЭ80Б как шпинели магния, так и цеолитов в количестве до 1,0 мас. % приводит к повышению износостойкости до 10 %. Максимального эффекта удается достичь при введении в ПЭ 0,05 мас. % шпинели. Износостойкость ПЭ2НТ11 при введении указанных наполнителей снижается до 20 %.

Неоднозначное влияние нанонаполнителей на износостойкость ПЭ, по-видимому, определяется особенностями строения их макромолекулярной цепи. ПЭ2НТ11 характеризуется наличием двух ярко выраженных фракций (низко- и высокомолекулярной). Низкомолекулярная часть полимера характеризуется большей подвижностью. Поэтому наполнитель распределяется именно в низкомолекулярной части полимера, что приводит к формированию областей с повышенной концентрацией наполнителя, которые интенсивнее изнашиваются при абразивном воздействии. Структура макромолекулярной цепи ПЭ80Б характеризуется наличием коротких боковых ответвлений, которые обеспечивают полимеру лучшую перерабатываемость при сохранении фазовой однородности. Поэтому введение нанонаполнителей в ПЭ80Б обеспечивает формирование более упорядоченной однородной надмолекулярной структуры с высокими значениями износостойкости. Этот вывод подтверждается результатами исследования степени кристалличности. Степень кристалличности ПЭ80Б не зависит от наличия наполнителя. Небольшое повышение значений степени кристалличности наблюдается для композитов на основе ПЭ2НТ11, вероятно, за счет кристаллизации низкомолекулярной составляющей полимера.

Таким образом, исследование нанокomпозитов на основе полиэтиленов с различной макромолекулярной структурой показало, что введение нанодобавок в количестве до 1,0 мас. % позволяет существенно повысить физико-механические характеристики ПЭ и в отдельных случаях его износостойкость. Установлено, что уровень изменения характеристик определяется особенностями строения их макромолекулярной цепи.

## Литература

1. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Слепцова С. А., Гоголева О. В. Полиолефиновые композиты триботехнического назначения для узлов трения автомобилей // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13. С. 797–803.
2. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Гоголева О. В., Федоров А. Л. Фторполимерные композиты триботехнического назначения // Трение и износ. 2007. Т. 28. № 6. С. 627–633.
3. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Байбарацкая М. Ю. Мамаев О. А. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. М. : ООО «Недра–Бизнесцентр». 2004. 262 с.
4. Миллер Т. Н. Плазмохимический синтез и свойства порошков тугоплавких соединений // Неорганические материалы. 1979. № 4. С. 557–561.
5. Колодезников К. Е. Цеолитоносные провинции востока Сибирской платформы. – Якутск : ЯФ изд. СО РАН. 2003. 224 с.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА В95/SiC ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Смирнов С.В.<sup>1</sup>, Коновалов А.В.<sup>1</sup>, Мясникова М.В.<sup>1</sup>, Халевицкий Ю.В.<sup>1</sup>,  
Смирнов А.С.<sup>1</sup>, Игумнов А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

<sup>2</sup>Институт математики и механики Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Софьи Ковалевской, 16, Екатеринбург, 620990, Россия,  
e-mail: [marina@imach.uran.ru](mailto:marina@imach.uran.ru)

Металломатричные композиционные материалы (ММК) – это новый класс гетерофазных материалов, которые нашли применение в различных отраслях машиностроения, транспортного строительства, а также при изготовлении деталей электротехнического назначения, элементов авиационной и ракетно-космической техники. Широкий спектр использования ММК обусловил актуальность проведения исследований их механического поведения при разных схемах нагружения. Такие исследования, как правило, являются междисциплинарными и базируются на использовании методов механики сплошных сред, вычислительной механики и материаловедения. Именно комплексный подход позволяет наиболее полно описать закономерности пластической деформации и разрушения ММК для создания научно-обоснованных технологий изготовления изделий методами пластического формоизменения.

В настоящей работе на примере случайно выбранного фрагмента микроструктуры описана методология вычислительной постановки и численной реализации задачи моделирования напряженно-деформированного состояния ММК на макро- и микромасштабных уровнях при одноосном растяжении и сжатии с учетом особенностей строения и реологии компонентов композита.

В качестве модельного материала использовали ММК, матрицей которого является гранулированный алюминиевый сплав В95 системы Al–Zn–Mg–Cu, а наполнителем – частицы SiC в форме призм или пластин со средним размером 4 мкм. Содержание SiC в композите составляет 30 об. %. Данный ММК изготовлен методом спекания, вследствие чего имеет ячеистую микроструктуру, при которой каждая гранула матрицы находится в окружении пористой малосвязной прослойки, состоящей из скоплений частиц SiC.

Экспериментально установлено, что в условиях горячего прессования ММК в изначально хрупкой прослойке происходят структурные изменения, связанные с затеканием матрицы между отдельными частицами SiC. Наличие материала матрицы в прослойке является причиной того, что она может пластически деформироваться. Для того, чтобы учесть этот факт, при определении эффективных свойств прослойки в условиях горячей пластической деформации применили правило смеси в зависимости от объемного содержания матрицы и наполнителя в материале ММК. При этом использовали допущение о том, что объемная доля прослойки в материале ММК не меняется.

На основе двухуровневого структурно-феноменологического подхода разработана 3D вычислительная модель деформации ячеистой структуры ММК, учитывающая особенности строения и реологии его компонентов. Модель представляет собой композицию из структурно-неоднородного микрообъема материала в окружении буферного слоя с усредненными механическими макросвойствами композита, определенными экспериментально. В такой постановке решения задачи на макро- и микромасштабных уровнях являются связными и корректными при рассмотрении больших пластических деформаций, поскольку устраняется проблема нетипичного поведения структурных компонент вблизи свободных граней микрообъема композита.

Показана возможность использования данной модели для моделирования механического поведения исследуемого ММК на макро- и микромасштабных уровнях для одноосного растяжения и сжатия при температуре 400 °С. Численные расчеты производили в квазиста-

тической постановке на вычислителе кластерного типа «URAN» ИММ УрО РАН. По их результатам построили поля распределения эквивалентной деформации и среднего нормального напряжения в узлах конечно-элементной сетки микрообъема композита, позволяющие описать неоднородность напряженно-деформированного состояния ММК на микроуровне. Установлено формирование зон локальной пластической деформации и концентрации растягивающих напряжений в микрообъеме ММК вследствие структурных особенностей композита и связанной с ними несовместности деформаций его компонентов.

*Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФ 14-19-01358 в части разработки вычислительной модели ММК В95/SiC.*

# РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С НЕНУЛЕВЫМ КРАЕВЫМ РЕЖИМОМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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*

В работе рассмотрена двумерная краевая задача для нелинейного дифференциального уравнения параболического типа с вырождением [1, 2]:

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

с краевым условием

$$u|_{\rho=a(\varphi)} = f(t, \varphi). \quad (2)$$

Уравнение  $\rho = a(\varphi)$  задает в полярной системе координат замкнутую гладкую линию, содержащую начало координат,  $f(0, \varphi) = 0$ ;  $f_t(0, \varphi) > 0$ . В литературе задача (1), (2) называется задачей А.Д. Сахарова об инициации тепловой волны [2]. Численные алгоритмы для решения подобных задач в случае одной пространственной переменной разработаны ранее в работах [3, 4]. В работе [5] рассмотрена двумерная задача при краевом условии, задающем движение нулевого фронта тепловой волны. В разработанном в этой работе алгоритме на каждом шаге по времени методом граничных элементов решается краевая задача для уравнения Пуассона в известной области, ограниченной начальным и текущим положениями нулевого фронта. В случае, когда задано краевое условие (2), эта область неизвестна и предложенный в [5] алгоритм не может быть применен.

Для решения задачи (1) и (2) в данной работе разработан алгоритм, основанный на замене местами в уравнении (1), записанном в полярной системе координат:

$$u_t = uu_{\rho\rho} + \frac{u^2}{\sigma} + \frac{uu_\rho}{\rho} + \frac{1}{\rho^2} \left( \frac{u_\varphi^2}{\sigma} + uu_{\varphi\varphi} \right), \quad (3)$$

искомой функции  $u$  и радиальной координаты  $\rho$ . В результате на каждом шаге по времени может быть рассмотрена краевая задача для уравнения Пуассона относительно функции  $\rho$  в известной области. Решение этой задачи методом граничных элементов на каждом шаге может быть без потери точности преобразовано в решение исходной задачи (1) и (2).

*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. Казаков А. Л., Спевак Л. Ф., Нефедова О. А. Решение двумерной задачи о движении фронта тепловой волны с использованием степенных рядов и метода граничных элементов // Известия ИГУ. Серия Математика. – 2016. – Т.18. – С. 21–37.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЙ ДИАГНОСТИКИ ТРЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

Тихонов Р.С.<sup>a)</sup>, Старостин Н.П.<sup>b)</sup>

*Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН. Россия,  
677007, д. 20, ул. Автодорожная, г. Якутск, Республика Саха (Якутия),*

*<sup>a)</sup>[roman\\_tikhon@mail.ru](mailto:roman_tikhon@mail.ru), <sup>b)</sup>[nikstar56@mail.ru](mailto:nikstar56@mail.ru)*

При стендовых и эксплуатационных испытаниях узлов трения машин и механизмов существующими способами практически невозможно измерить силу трения. В подобных случаях перспективным является использование метода тепловой диагностики трения, позволяющего определять момент силы трения в подшипниках скольжения по температурным данным. Метод основан на факте, что практически вся энергия, затрачиваемая на трение, переходит в теплоту и сводится к измерению температуры в окрестности зоны трения, построению математической модели и решению граничной обратной задачи восстановления фрикционного тепловыделения и, соответственно, мощности трения.

В работе приводится математическая модель теплового процесса в системе полимерных подшипников скольжения на общем валу с учетом скорости его вращения. Принимая допущение об однородности распределения температуры по длине втулок и корпусов, нестационарное температурное поле в них описывалось двумерными уравнениями, а в вале – трехмерным уравнением с конвективным членом, учитывающим его скорость вращения. В зонах трения записывались условия фрикционного тепловыделения. На остальных границах задавались традиционные условия первого и третьего рода. Начальное распределение считалось однородным.

На основе вычислительных экспериментов с решением прямых задач определен максимальный шаг по времени, обеспечивающий приемлемую для практических расчетов точность решения.

Обратная задача определения функций фрикционного тепловыделения решалась методом итерационной регуляризации на основе градиентных методов минимизации функционала невязки методом сопряженных градиентов. Эффективность практического определения функций фрикционного тепловыделения обратной задачи проверялось экспериментально. Экспериментальная проверка проводилась на модуле испытаний на трение и износ антифрикционных композиционных материалов, в котором одновременно испытывались 4 образца. Температуры в пределах зоны контакта во втулках регистрировались устройством L-Card. Ввиду осцилляции с большой амплитудой в измерениях температур во втулках, температурные данные обрабатывались статистическими методами и сглаживались кубическими сплайнами. Полученные таким образом температурные данные использовались для восстановления моментов трения подшипников путем решения обратной задачи. Расхождения значений суммарного момента силы трения, полученных решением обратной задачи и измерением индуктивным датчиком трения, не превышают 10–15 %.

# ИНТЕРАКТИВНЫЙ КАЛЬКУЛЯТОР ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВАНИЯ

Шишин Н.Н.<sup>1</sup>, Бабайлов Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», д. 1, ул. Рабочей молодежи, г. Верхняя Салда, 624760, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФБУН Институт машиноведения УрО РАН, д.34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, e-mail: [babailov@imach.uran.ru](mailto:babailov@imach.uran.ru)

Цель работы: разработать интерактивный технологический калькулятор для расчета энергосиловых параметров процессов прессования цветных металлов и сплавов, в т. ч. прямого и обратного прессования цветных металлов и сплавов. С помощью программы выполнить расчет средней температуры заготовки при прессовании прутков и труб из титановых сплавов.

Интерактивный калькулятор позволяет использовать понятный для пользователя интерфейс программы и быстро выполнить требуемые технологические расчеты.

В рамках научно-исследовательской работы студента Н.Н. Шишина разработан интерактивный калькулятор для расчета усилия прессования по методикам различных российских и зарубежных исследователей процессов ОМД (например И.Л. Перлина и др.), который является удобным, практичным программным средством для выполнения технологических расчетов и анализа исследуемых процессов [1, 2].

Технологический калькулятор выполняет расчеты усилия деформирования заготовки в различных процессах прессования металлов и сплавов (по выбору пользователя). Калькулятор представляет собой программное приложение для Windows XP, 7, 8 и 10.

Калькулятор рассчитан на широкий круг лиц и будет полезен всем, от студентов до инженеров-технологов, которым данное интерактивное приложение поможет осуществить анализ различных процессов прессования, технологически обоснованный подбор размеров прессуемого слитка, подбор параметров прессования, в том числе температурно-скоростных условий прессования, а также выполнить расчет на прочность основных элементов прессового инструмента (многослойного контейнера, игл, матриц и др.). В качестве рабочего инструмента при разработке пользовательской программы – технологического интерактивного калькулятора – выбран объектно-ориентированный язык программирования C Sharp (C#), являющийся аналогом языка C++.

Перспективой выполняемого проекта является создание ряда интерактивных калькуляторов по определению энергосиловых параметров при осуществлении других процессов ОМД, например, при волочении и прокатке. В настоящее время работа ведется по реализации интерактивного калькулятора для расчета силы волочения проволоки, прутков и труб из цветных металлов и сплавов.

В работе выполнен расчет средней температуры слитка при прямом прессовании прутков и труб из различных промышленных титановых сплавов. Выполнено сравнение рассчитанных по программе и экспериментальных данных, замеренных на производстве.

## Литература

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВОБОДНОЙ КОВКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Шубина А.Н., Бабайлов Н.А.

*ФБУН Институт машиноведения УрО РАН, д.34, ул. Комсомольская,  
г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,  
e-mail: [babailov@imach.uran.ru](mailto:babailov@imach.uran.ru)*

Цель работы: математическое и физическое моделирование технологических операций свободной ковки поковок (типа плит и пластин) из цилиндрических литых или предварительно деформированных заготовок для получения заготовки для дальнейшей прокатки, в том числе из молибденовых сплавов.

Экспериментальные исследования новой технологии ковки были проведены на лабораторном оборудовании кафедры «Обработка металлов давлением» УрФУ (руководители проекта: профессор, к.т.н. С.П. Буркин, профессор, д.ф.-м.н. А.Р. Бекетов)

Разработанная технология свободной ковки заготовок из труднодеформируемых сплавов включает следующие операции: осесимметричная осадка на плоских бойках с относительной высотной деформацией, определяющей величину накопленной за цикл степени уковки слитка и являющейся основным параметром данной технологии ковки поковок типа пластин; обжатие осаженой заготовки в направлении диаметра; ковка обжатой заготовки с восстановлением формы и размеров исходной заготовки; расплющивание цилиндрической поковки на плоских бойках; кузнечную протяжку с получением плиты или пластины заданных размеров.

Представлены варианты технологии свободной ковки поковок (типа плит и пластин) из цилиндрических литых или предварительно деформированных заготовок с двумя и с тремя операциями осадки.

Разработан универсальный штамповый инструмент, используемый для деформации заготовок в условиях лаборатории кафедры ОМД УрФУ.

В работе выполнено моделирование технологических процессов свободной ковки, входящих в технологию получения металлоизделий из труднодеформируемых сплавов. Методом конечных элементов получено распределение деформаций и напряжений по сечению получаемой заготовки на каждом переделе свободной ковки. Определено температурное поле заготовки на разных этапах деформирования.

Выполнены экспериментальные исследования указанных процессов свободной ковки на модельном материале (свинец), который позволяет моделировать процессы горячей деформации.

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Якименко И.В.<sup>1</sup>, Лямец Л.Л.<sup>2</sup>, Канищев О.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Филиал ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», 1, Энергетический проезд, г. Смоленск 214013, РФ,  
e-mail: [jakigor@rambler.ru](mailto:jakigor@rambler.ru)

<sup>2</sup>Филиал ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», 1, Энергетический проезд, г. Смоленск 214013, РФ,  
e-mail: [LLL190965@yandex.ru](mailto:LLL190965@yandex.ru)

<sup>3</sup>ФГУП «СПО «Аналитприбор», 3, ул. Бабушкина, г. Смоленск, 214031, РФ,  
e-mail: [asuspost@rambler.ru](mailto:asuspost@rambler.ru)

Целью исследования является разработка модели процесса эксплуатации измерительной газоаналитической системы, позволяющей учесть влияние периодичности замены, уровня безотказности и ремонтпригодности, а также интенсивности эксплуатации и обеспеченности ЗИП.

Измерительные газоаналитические системы (ИГС) – информационно-измерительные системы, включающие в себя устройства пробоотбора и пробоподготовки, газоаналитические преобразователи и универсальные аналитические приборы, объединённые методическим обеспечением. Названные системы применяются для обеспечения требований промышленной безопасности к эксплуатации опасного производственного объекта, экологического контроля, обеспечения безопасных условий и охраны труда, а также технологического контроля.

Одним из наиболее перспективных направлений моделирования процесса эксплуатации систем соответствующей по сложности ИГС является использование теории полумарковских процессов (ПМП), позволяющей более полно, по сравнению с марковскими процессами, учесть многообразие вероятностных процессов протекающих при взаимодействии человека и технической системы в процессе её эксплуатации.

С использованием теории ПМП была получена модель процесса эксплуатации ИГС, учитывающая основные эксплуатационные факторы и позволяющая определять основные показатели процесса эксплуатации, но с её помощью невозможно исследовать характер и учесть влияния периодичности замены, уровня безотказности и ремонтпригодности, а также интенсивности эксплуатации и обеспеченности ЗИП на надёжность изделий.

Очевидно, что коэффициент готовности ИГС, т. е. выбранного ОК, зависит от основных параметров системы эксплуатации:

- периодичности проведения проверок;
- достоверности этих проверок;
- номенклатуры, состава и эшелонирования комплектов ЗИП и стратегии их пополнения;
- условий эксплуатации – объективных (параметров внешней среды) и субъективных (интенсивности эксплуатации).

С учётом вышеназванных требований была разработана полумарковская модель (ПММ) эксплуатации ИГС, которая в отличие от известной учитывает влияние периодичности замены, уровня безотказности и ремонтпригодности, а также интенсивности эксплуатации и обеспеченности ЗИП на надёжность ИГС и позволяет исследовать характер этого влияния.

Верификация полученной ПММ позволила выработать методику обоснования периодичности замены, интенсивности эксплуатации и обеспеченности ЗИП изделий газового анализа специального назначения, которая в отличие от известных базируется на впервые разработанной математической модели процесса эксплуатации и позволяет определить оптимальные значения перечисленных параметров эксплуатации.

Предлагаемая методика обоснования периодичности замены и интенсивности эксплуатации включает три этапа.

1. На основании исходных данных рассчитывается значение коэффициента готовности как функция периодичности и интенсивности эксплуатации.

2. Задаётся диапазон изменения продолжительности работы под током. Значение этого параметра выбирается таким, чтобы обеспечивался требуемый уровень коэффициента готовности.

3. Аналогично задаётся диапазон изменения периодичности замен. Величина этого параметра выбирается такой, чтобы обеспечивалось требуемое значение коэффициента готовности, величина которого берётся из технического задания на разработку ИГС.

Предлагаемая методика расчёта ЗИП, сводится к итерационному расчёту вероятности отказа ЗИП, при добавлении одного запасного элемента в его состав на каждый шаг итерации. Далее путём сравнения вероятностей, после каждого шага итерации принимается решение о целесообразности дальнейшего пополнения ЗИП, т. е. если существенного прироста вероятности не произошло, то дальнейшее увеличение ЗИП следует остановить.

Таким образом, полученная ПММ является искомой моделью процесса эксплуатации ИГС, позволяющей учесть влияние периодичности замены, уровня безотказности и ремонтно-пригодности, а также интенсивности эксплуатации и обеспеченности ЗИП на надёжность ОК и позволяет исследовать характер этого влияния с целью получения их оптимальных значений.

## ОЦЕНКА ФУНКЦИИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ МАЛЫХ ВЫБОРОК

Якименко И.В.<sup>1</sup>, Лямец Л.Л.<sup>2</sup>, Канищев О.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Филиал ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», 1, Энергетический проезд, г. Смоленск 214013, РФ,  
e-mail: [jakigor@rambler.ru](mailto:jakigor@rambler.ru)

<sup>2</sup>Филиал ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», 1, Энергетический проезд, г. Смоленск 214013, РФ,  
e-mail: [LLL190965@yandex.ru](mailto:LLL190965@yandex.ru)

<sup>3</sup>ФГУП «СПО «Аналитприбор», 3, ул. Бабушкина, г. Смоленск, 214031, РФ,  
e-mail: [asuspost@rambler.ru](mailto:asuspost@rambler.ru)

Целью исследования является выявление преимуществ и особенностей применения функции выживаемости для описания надежности технических изделий на основании анализа малых цензурированных выборок, полученных в результате спланированных испытаний опытных образцов.

Технические изделия заданного целевого назначения являются объектами, которые можно рассматривать как системы взаимосвязанных элементов с определенной структурной организацией первичных элементов. Расчет показателей надежности таких объектов может быть произведен на основании заданной структурной схемы при известных показателях надежности первичных элементов.

Определение показателей надежности первичных элементов является важной задачей. Показатели надежности первичного элемента могут быть определены статистическими методами на основе обработки результатов спланированных испытаний опытных образцов. Для практической реализации статистических методов и обеспечения требуемой точности статистических выводов необходимо иметь в распоряжении выборочные экспериментальные данные достаточно большого объема. Практически это условие при высокой стоимости исследуемых опытных образцов, как правило, трудно обеспечить.

Надежность исследуемых технических изделий оценивалась на основании малых цензурированных выборок, формирование которых планировалось строго определенным образом. Очевидно, что планирование и формирование таких выборок на основе научно обоснованных методик в условиях конкретного предприятия должно иметь необходимую нормативную основу. В ходе проводимого исследования была разработана и рекомендована для практического применения методика сбора первичной информации, разработаны протоколы наблюдений, проводимых с целью анализа надежности при использовании цензурированных наблюдений.

С формальной стороны при исследовании надежности технических изделий исследуемой переменной является время, которое прошло от начала наблюдения до наступления критического события. В проводимом исследовании критическим событием был отказ опытного образца. Также был зафиксирован период наблюдения за опытными образцами.

Основная задача, которая решалась в ходе анализа данных, полученных в результате спланированных испытаний опытных образцов, заключалась в оценке функции надежности по данным, содержащим как полные, так и неполные (цензурированные) наблюдения. Использование цензурированных наблюдений позволило сохранить имеющуюся эмпирическую информацию, которая имеет особую ценность в условиях анализа малых выборок.

В проводимом исследовании учитывались две основные причины возникновения цензурированных данных:

- критическое событие (отказ) для наблюдаемого опытного образца в течение периода наблюдения не наступило;
- опытный образец выбыл из-под наблюдения в исправном состоянии до окончания периода наблюдения (потерян из виду), и критическое событие (отказ) за время наблюдения зафиксировано не было.

На основании малой цензурированной выборки эмпирическая оценка функции надежности вычислялась моментным методом Каплана-Мейера. Для упрощения вычислительной процедуры использовались фиксированные моменты времени, в которые произошел отказ хотя бы одного опытного образца. Следует отметить, что реализуемой методике в фиксированные моменты времени и в промежутках между ними может происходить изъятие единиц наблюдения из проводимого исследования, т. е. могут иметь место цензурированные наблюдения. Точность вычисления функции надежности определялась стандартной ошибкой, вычисленной по формуле Гринвуда.

Кроме функции надежности для фиксированных моментов времени, в которые произошли критические события (отказы), вычислялась функция интенсивности риска.

Вычисленные функция надежности и функция интенсивности риска позволяют судить о надежности исследуемых технических изделий в интересующие моменты времени. Изменение во времени надежности и интенсивности риска позволяет определить моменты времени или временные интервалы, в которых надежность мала и риск отказа велик. Использование этой информации имеет большое практическое значение.

# МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ: ОПИСАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Грибов Д.С., Чечулина Е.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ),  
пр. Комсомольский 29, Пермь, 614990, Россия,  
e-mail: [gribowdmirrii@yandex.ru](mailto:gribowdmirrii@yandex.ru), [zhenya-chechulina@yandex.ru](mailto:zhenya-chechulina@yandex.ru)*

Многоуровневые модели для описания пластического деформирования кристаллических материалов в последние 20–30 лет приобрели всеобщее признание механиков и металловедов. Данное обстоятельство в немалой степени обусловлено огромным ростом возможностей вычислительной техники, что позволяет ввести большое число внутренних переменных и эволюционных уравнений для описания характеристик внутренней структуры материала: зёрненной структуры, плотностей дислокаций различных типов, концентрации и распределения примесей, присутствующих в материале, что невозможно описать с позиции макрофеноменологических моделей.

Прямой учет дефектной структуры позволяет, среди прочих, описать эффект Баушингера, который заключается в падении критических напряжений при реверсивном нагружении; эффект Портевена – Ле Шателье, который характеризуется появлением зубцов на диаграмме *напряжение–деформация*, может быть описан с применением данного типа моделей путём учета взаимодействия дислокаций с примесными атомами.

В работе предлагается прямая трёхуровневая модель; точкой интегрирования макроуровня является элемент мезоуровня 1, включающий в себя набор элементов мезоуровня 2; структурно элементы мезоуровня 1 и мезоуровня 2 совпадают, отличаясь только пространственным масштабом. Основной модой пластического деформирования является скольжение краевых дислокаций; на макроуровне и мезоуровне 1 применяется аддитивное разложение градиента скорости на упругую и пластическую составляющие. Расчёт скоростей деформаций в каждом узле производится с использованием метода конечных элементов (МКЭ), на мезоуровне 1 определяются упругие и неупругие деформации и напряжения, на мезоуровне 2 описывается эволюция плотностей дефектов по системам скольжения (СС) и определяются скорости сдвигов.

На мезоуровне 1 определяется отклик (напряжения) кристаллита по передаваемому с макроуровня градиенту скорости. С мезоуровня 2 на мезоуровень 1 передаются скорости движения дислокаций по СС, при свертке с ориентационным тензором (характеризующимся вектором Бюргерса дислокации и вектором нормали СС) определяется неупругая часть градиента скорости, с использованием которой устанавливаются упругая составляющая градиента скорости перемещений и компоненты тензора напряжений Коши с применением закона Гука, используемого в дальнейшем при решении задачи с помощью МКЭ.

Подход к описанию дислокационной структуры основан на введении однородных плотностей дислокаций и плотностей барьеров на каждой СС, эволюция дефектной структуры кристаллита описывается на мезоуровне 2. Общая плотность дислокаций на каждой СС выражается в виде суммы плотностей мобильных и иммобильных дислокаций. Эволюционные уравнения плотностей мобильных дислокаций по СС описывают: зарождение дислокаций путём работы источников Франка-Рида и др., аннигиляцию дислокаций на одной СС с противоположными нормальями к плоскости залегания, запирающие дислокации на барьерах, обход барьеров по термоактивируемым механизмам и механизму разрушения барьеров при достижении критических напряжений на барьере.

Барьеры дислокационной (Ломера–Коттрелла и Хирта) и недислокационной природы (границы зерен, дислокации леса, облака примесных атомов) в работе описываются как преграды, образование барьеров происходит при множественном скольжении, разрушение происходит рекомбинацией при превышении критических напряжений на барьере.

Критические напряжения на СС определяются текущим состоянием плотностей дефектов на СС. Средние скорости движения дислокаций определяются действующими напряжениями, температурой и плотностями дефектов. Скорости движения дислокаций, определенные на мезоуровне 2, передаются на мезоуровень 1, где с использованием уравнения Орована устанавливаются скорости сдвигов.

Проведен цикл численных экспериментов по определению изменения плотности дислокаций, изменению критических напряжений на различных системах скольжения от интенсивности деформаций.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-01-00379, № 16-31-00215 мол\_а).*

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФТОРПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ КОБАЛЬТА

Баронин Г.С.<sup>1</sup>, Бузник В.М.<sup>1,2</sup>, Дмитриев О.С.<sup>1</sup>, Мищенко С.В.<sup>1</sup>,  
Завражин Д.О.<sup>1</sup>, Худяков В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет,

106, ул. Советская, Тамбов, 392000, Россия, e-mail: [zavrazhin-do@yandex.ru](mailto:zavrazhin-do@yandex.ru)

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,

17, ул. Радио, Москва, 105005, Россия

Композиты на основе полимеров (ПКМ) находят широкое применение для замены изделий из металлов. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) является перспективным материалом, обладающим рядом уникальных свойств: химической и термостойкостью, гидрофобностью, низким коэффициентом трения и т.д. В то же время, его нерастворимость и высокая вязкость расплава не позволяют применять жидкофазные технологии, используемые для других полимеров, при получении композитов с гомогенным распределением неагломерированных наночастиц наполнителя. Многие свойства ПКМ, включая эксплуатационные, зависят от распределения наполнителя в композите. Коллективом под руководством В.М. Бузника были разработаны методы получения ПТФЭ-композитов с наноразмерными наполнителями. Созданные композиты по своим характеристикам превосходят исходную матрицу политетрафторэтилена.

В работе проводился анализ теплофизических свойств (теплоемкость, теплопроводность) композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и наночастиц кобальта (ПТФЭ+КоФП).

Исследование теплопроводности  $\lambda$  проводилось с помощью информационно-измерительной системы теплофизических свойств твердых материалов.

Измерение теплоемкости  $c$  проводилось на модернизированном приборе ИТС-400 и с помощью информационно-измерительной системы исследования процесса отверждения полимерных композитов.

Исследования тепловых эффектов и величины скорости поглощения энергии в области 50–350 °С композитов проводили методом дифференциальной сканирующей калориметрии на DSC-2 (Perkin Elmer).

Максимальные значения удельной скорости поглощения энергии композита ПТФЭ+КоФП наблюдались при концентрации 0,05 мас. част. КоФП на 100 мас. част. ПТФЭ. Анализ полученных данных показал, что при этой концентрации наблюдается наибольшее межцепное взаимодействие в силу образования большего количества межмолекулярных связей между полимерной цепью и активными участками поверхности нанонаполнителя.

Абсолютная максимальная величина поглощения энергии образцом в области плавления  $W$  для всех систем достигается в интервале концентрации дисперсного наполнителя КоФП 0,05–0,5 мас. част. Наблюдаемое снижение величины  $W$  с увеличением содержания наполнителя связано с тем, что при повышении концентрации нанонаполнителя свыше 0,05 масс.част. происходит агрегирование наночастиц, связанное со снижением активности поверхностных слоев наполнителя.

Теплофизические исследования полимерного композита показали, что дисперсный наполнитель КоФП в концентрации до 1,0 мас. част. резко повышает взаимодействие в граничном слое полимер-наполнитель. А также делает структуру более жесткой за счет образования большого количества связей между полимерной матрицей и активными участками поверхности наноразмерного наполнителя.

Экстремальные концентрационные зависимости теплофизических свойств комбинированного фторполимерного материала говорят как об однофазном, так и о многофазном строении полимерной системы ПТФЭ+КоФП. Характер изменения теплофизических свойств полимерного нанокомпозита в области малых добавок модификатора КоФП и наличие точки экстремума указывают на переход системы из однофазной структуры в двухфазную (спино-

дальний распад) и наоборот. Подобные физические механизмы формирования структуры отмечены нами ранее для полимерных смесей и сплавов, компоненты которых находятся в наноструктурированном состоянии. При переходе системы из однофазной к двухфазной (расплавление) выделяющаяся фаза находится в высокодисперсном состоянии и образует термодинамически устойчивую систему с размером частиц не выше нескольких десятков нанометров. Межфазный слой в такой полимерной системе имеет значительную толщину, а межфазная поверхность велика. Высокорастворимая поверхность раздела фаз и наличие наночастиц приводят к экстремальному изменению теплофизических свойств полимерной системы в данной концентрационной области, т. е. являются определяющими факторами.

Разница в энергетическом состоянии нанокompозита, в сравнении с исходным ПТФЭ обусловлена изменением всего комплекса показателей системы: снижение теплопроводности  $\lambda$  и снижение теплоемкости  $\rho$

*Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (проект 9.7746.2017/8.9).*

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ФТОРОПЛАСТА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ ТИТАНА

Баронин Г.С.<sup>1</sup>, Бузник В.М.<sup>1,2</sup>, Дмитриев О.С.<sup>1</sup>, Завражина К.В.<sup>1</sup>,  
Мищенко С.В.<sup>1</sup>, Завражин Д.О.<sup>1</sup>, Худяков В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет,  
106, ул. Советская, Тамбов 392000, Россия, e-mail: zavrazhin-do@yandex.ru  
<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,  
17, ул. Радио, Москва, 105005, Россия

В настоящее время одной из приоритетных областей материаловедения является создание полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые имеют более сложную структуру и улучшенные характеристики. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) является перспективной составной матрицей из-за его свойств: химической и термической стойкости, коэффициента низкого трения, высокой гидрофобности и других. В то же время нерастворимость и высокая вязкость расплава ПТФЭ привели к трудностям получения гомогенных композитов без агрегации частиц наполнителя, что в значительной степени определяет свойства ПКМ.

В работе представлены исследования структуры и свойств композитов на основе ПТФЭ с микро- и наноразмерными наполнителями, содержащими титан (ТФП). Существует несколько технологических методов получения нанокомпозитов на основе ПТФЭ. Пиролиз смеси ПТФЭ и фторида аммония дает ультрадисперсный композитный порошок из ПТФЭ и неорганических фторидов  $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ .

В качестве полимерной матрицы использовали суспензию ПТФЭ (ГОСТ 10007-80). Композиты были приготовлены в режиме механического смешивания, затем таблетирование и спекание с концентрациями ТФП 0,05; 0,1; 0,5; 1 и 5 вес. частей со 100 мас. частями ПТФЭ.

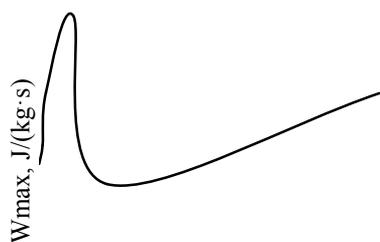
Режимы подготовки образца: перемешивание в электромагнитном смесителе в течение 30 мин с частотой вращения 1000 об./мин. Таблетирование в плунжерной пресс-форме с давлением 100 МПа в течение 60 с. Спекание при  $T = 638\text{--}643\text{K}$  в течение 60 мин без избыточного давления. Полученные блок-композиты названы ПТФЭ+ТФП.

Для оценки эксплуатационных показателей исследуемых ПКМ проведены следующие испытания:

- определение удельной скорости поглощения энергии (ДСК);
- определение теплостойкости и внутренних ориентационных напряжений;
- определение теплопроводности и температуропроводности;
- измерение диэлектрической проницаемости;
- оценка износостойкости в режиме абразивного износа.

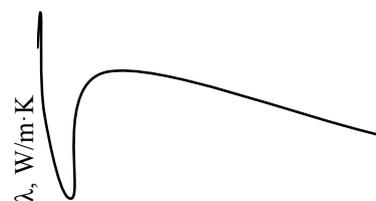
Сложное строение микро- нанокомпозита из-за наличия спектра низко- и высокомолекулярных фракций полимерного компонента, используемого в работе в качестве модифицирующего наполнителя комбинированного фторполимерного материала, взаимодействие данного микро- нанокомпозита с матрицей ПТФЭ и определяет в области малых добавок экстремальные концентрационные зависимости всего комплекса физико-химических свойств в области малых концентраций (рисунок).

Измерение проницаемости образцов композитов проводилось на частотах 20, 50, 100, 200, 500 Гц; 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 кГц; 1 и 2 МГц, перекрывая рабочий диапазон LCR-измерителя. Для композитов были отмечены экстремальные концентрационные зависимости  $\epsilon$  от содержания диспергированных наполнителей ТФП. В то же время частотная зависимость  $\epsilon$  для всех исследованных композитов не обнаружена.



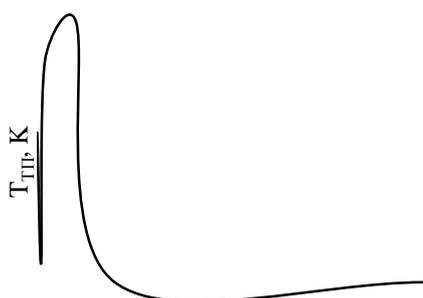
C, w.p.

a



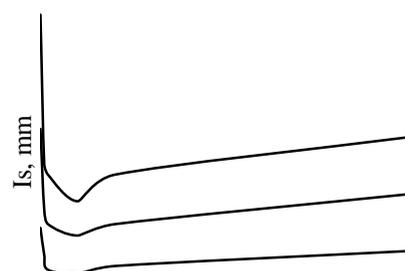
C, w.p.

б



C, w.p.

в



C, w.p.

з

Концентрационные зависимости максимальной скорости поглощения энергии  $W_{\max}$  снятой на приборе DSC-2 (a); теплопроводности  $\lambda$  (б); деформационной теплостойкости  $T_{\text{тп}}$  (в); и размерного износа  $I_s$  (з) полимерного композита ПТФЭ+ТФП от содержания наполнителя. Время абразивного износа 20 мин (1), 40 мин (2), 60 мин (3); частота вращения контртела 12 об./мин; усилие прижима 0,5 кг

В работе показана возможность контроля структуры и свойств полимерных композитов на основе ПТФЭ небольшими концентрациями добавок дисперсных нанокомпозитов на основе ультратонких ПТФЭ и титансодержащих наночастиц.

Теплостойкость модульных молекулярных композитов ПТФЭ+ТФП на 25° превышает исходный ПТФЭ, а прочность – в 2–4 раза. Максимальные значения свойств системы ПТФЭ+ТФП достигаются уже при внесении 0,5 мас. частей модификатора.

*Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (проект 9.7746.2017/8.9).*

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОВОЛН УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ И ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИТАМИ

Мищенко С.В., Завражин Д.О., Туголуков Е.Н.

Тамбовский государственный технический университет, 106, ул. Советская, Тамбов 392000, Россия,  
e-mail: [zavrazhin-do@yandex.ru](mailto:zavrazhin-do@yandex.ru)

В настоящее время микроволновый нагрев является одним из наиболее перспективных методов термообработки различных диэлектрических материалов, что объясняется рядом его особенностей. Прежде всего микроволновый нагрев позволяет обеспечить высокую скорость распределения температуры в материале и селективный нагрев гетерогенных материалов, что снижает потребление энергии всего процесса. Этот метод широко используется в технологических процессах, таких как предварительный нагрев формовочного материала, сварка термопластичных полимерных материалов и т. д.

Целью численного моделирования является определение степени поглощения СВЧ АБС-сополимером, модифицированным углеродными нанотрубками.

Углеродные нанотрубки в качестве модифицирующего материала позволяют использовать теплопроводность углерода, что повышает эффективность микроволнового нагрева полимерных материалов.

В работе использовался сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола АБС 2802-30 производства АО «Пластик».

В качестве модифицирующего материала использовались углеродные нанотрубки (УНТ) «Таунит» (производства ООО «Нанотехцентр», Россия, Тамбов) с размером частиц 40–100 нм. Способами получения УНТ являются химическое осаждение из паровой фазы (CC3) углеводородов (CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) с катализаторами (Ni/Mg) при атмосферном давлении и температуре 600–680 °С.

Компоненты сушили в вакуумной сушилке при температуре 100 °С в течение одного часа. Затем УНТ и гранулы АБС перемешивали в шаровой мельнице в течение одного часа. Скорость вращения барабана составляет 180 об./мин. Композиционные материалы перерабатывали на одношнековом экструдере при температуре нагревательного цилиндра 190 ч 210 °С.

Образцы диаметром 5 мм и длиной 15 мм, полученные литьевым формованием, нагревали в микроволновой печи с частотой 2450 МГц и выходной мощностью 700 Вт. Время микроволнового нагрева составляло около 0 ч 100 с.

Из-за значительной сложности процессов, сопровождающих микроволновый нагрев цилиндрического образца в экспериментальной печи, следует принять несколько предположений:

- плотность потока микроволнового излучения, проходящего через поверхность образца, постоянна во времени и по поверхности;
- степень отражения микроволнового излучения поверхностью образца одинакова для исходных и наномодифицированных материалов;
- коэффициент поглощения не зависит от температуры;
- изменение мощности микроволнового излучения по толщине образца подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бера;
- тепловые потоки вдоль оси образца отсутствуют.

Нестационарное температурное поле цилиндрического образца, нагретого СВЧ-полем, может быть смоделировано путем решения задачи нестационарной теплопроводности для сплошного неограниченного цилиндра с объемным функциональным источником тепла.

Результаты расчетов (с использованием C++):

1. Минимальное значение интенсивности СВЧ-излучения  $I_0 = 580 \text{ Вт/м}^2$ .
2. Фактическое значение интенсивности СВЧ-излучения  $I_0 = 830 \text{ Вт/м}^2$ .

3. Коэффициент поглощения СВЧ исходного образца  $k = 2,0 \cdot 10^3$  1/м.

4. Коэффициент поглощения СВЧ модифицированного образца  $k = 4,5 \cdot 10^3$  1/м.

5. Характеристики наномодифицированного сополимера АБС: плотность составляет  $1046 \text{ кг/м}^3$  (1,1 % изменения); тепловая мощность  $1790 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  (0,5 % изменения); теплопроводность составляет  $0,220 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  (3,0 % изменения).

В результате проведенных работ определено, что введение 1 мас. част. УНТ «Таунит» в АБС почти не изменяет теплофизических свойств полимера, но более чем в 2 раза увеличивает значение СВЧ-поглощения, что приводит к существенной интенсификации нагрева наномодифицированного АБС-сополимера в СВЧ.

*Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (проект 9.7746.2017/8.9).*

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СИЛОВОЙ МЕТАЛЛООПТИКИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕЕ РЕСУРСА

Филин С.А.<sup>1</sup>, Роголин В.Е.<sup>2,3</sup>, Каплунов И.А.<sup>3</sup>, Зингерман К.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова;  
36, Стремянный пер., 36, г. Москва, 117997, Россия

<sup>2</sup>ОАО «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»,  
95, Волоколамское ш., г. Москва, 125424, Россия

<sup>3</sup>Тверской государственный университет; 33, ул. Желябова, г. Тверь, 170100, Россия,  
e-mail: [Kaplunov.IA@tversu.ru](mailto:Kaplunov.IA@tversu.ru)

С целью увеличения ресурса силовой металлооптики исследованы особенности выбора растворителей для ее физико-химической очистки. На загрязнённой поверхности при очистке остаются визуально наблюдаемые белая пленка солей щелочных и щелочноземельных металлов, не растворяемые данным классом растворителей, и радужные полосы от взаимодействия углеводородов с металлом, что ухудшает оптические свойства и снижает ресурс зеркал. Показана необходимость при использовании растворителей ингибировать взаимодействие углеводородов с зеркалами стабилизацией растворителей или подбором режимов очистки.

# КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Огородников А.И., Тихонов И.Н.

*Уральский федеральный университет, 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, Россия,  
e-mail: [Al.Ogorodnikov@bk.ru](mailto:Al.Ogorodnikov@bk.ru)*

В данной работе создана трехмерная вычислительная модель лезвийной обработки хрупких материалов с функциональным покрытием. Проведён компьютерный анализ процесса скрайбирования и последующего разделения кремниевой пластины с применением конечно-элементного программного комплекса ANSYS Mechanical [1]. Расчетные результаты верифицированы экспериментальными данными.

На внутреннем языке программирования ANSYS APDL реализована параметрическая модель нанесения алмазным инструментом [2] риски на хрупкую пластину с обособленной поверхностью, свойства которой могут отличаться от основного материала, и написана программа для выбора параметров режима резания. Программа позволяет варьировать геометрию режущего инструмента и вычислять распределение внутренних напряжений в заготовке. Анализ подвергнуты геометрические параметры резца (четырёхгранная и усеченная пирамида), а также угловые параметры (в частности, пирамида с внутренним углом 120 градусов; пирамида, установленная с отклонением от нормали на 15 градусов) и их влияние на напряженное состояние пластины в зоне резания. Получено распределение напряжений в зоне резания для различных материалов и видов функциональных покрытий.

Качество обработанной поверхности кремниевой монокристаллической пластины после соответствующих вычислительным экспериментам тестовых испытаний проверялось методами оптической микроскопии. Получены количественные характеристики зоны разрушения вдоль риски, включая размеры микротрещин и сколов, при различных параметрах режима резания. Качество материала после механической обработки, определяемое размером дефектов, зависит от геометрии алмазного инструмента, направления резания, скорости движения резца и приложенных нагрузок. Зона поражения материала вдоль нанесенной риски при найденных оптимальных параметрах режима резания содержит сколы и внутренние трещины, но ширина этой зоны сравнительно мала.

## Литература

- 1 Огородников А. И., Власов В. Н., Огородникова О. М. Компьютерная оценка ожидаемого качества в системе управления технологическими процессами механической обработки // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 1. С. 123–127.
2. Огородников А. И., Жуков Ю. Н., Тихонов Э. Е., Савиных К. М. Лезвийный инструмент для разделительных операций хрупких листовых заготовок // Вестник машиностроения. 2015. № 3. С. 47–50.

# MODELING OF THE CRACK GROWTH UNDER MIXED MODE LOADING UNDER MIXED MODE LOADING BY MOLECULAR DYNAMICS METHOD AND LINEAR FRACTURE MECHANICS APPROACH

Stepanova L.V.

*Department of Mathematical Modeling in Mechanics, Samara,  
University, 443086, Samara, Moskovskoe shosse, 34, Russia,  
e-mail: [stepanova@sam-su.ru](mailto:stepanova@sam-su.ru)*

Atomistic simulations of the central crack growth process in an infinite plane medium under mixed-mode loading using Large-scale Molecular Massively Parallel Simulator (LAMMPS), a classical molecular dynamics code, are performed. The inter-atomic potential used in this investigation is Embedded Atom Method (EAM) potential. The plane specimens with initial central crack were subjected to Mixed-Mode loadings. The simulation cell contains 400000 atoms. The crack propagation direction angles under different values of the mixity parameter in a wide range of values from pure tensile loading to pure shear loading in a wide diapason of temperatures (from 0.1 K to 800 K) are obtained and analyzed. It is shown that the crack propagation direction angles obtained by molecular dynamics method coincide with the crack propagation direction angles given by the multi-parameter fracture criteria based on the strain energy density and the multi-parameter description of the crack-tip fields. The multi-parameter fracture criteria are based on the multi-parameter stress field description taking into account the higher order terms of the Williams series expansion of the crack tip fields [1]. The paper is focused on the application of the different approaches for the determination of the initial crack propagation angle. Copper plate with the central crack under complex mechanical stresses (Mode I and Mode II loading) is studied by extensive molecular dynamics simulations based on the EAM potential. On the other hand, the complete Williams expansion for the crack tip fields containing the higher-order terms is used. The crack propagation angle is obtained by 1) the multi-parameter fracture mechanics approach based on two fracture mechanics criteria, MTS and SED; 2) atomistic modeling for the mixed-mode loading of the plane medium with the central crack. From our simulations we can get crack propagation directions and crack angles. Calculations of MD method were run for three different values of  $M^c$ : 0.4, 0.5 and 0.6. Calculated values of crack angles were  $-51.5^\circ$ ,  $-46.6^\circ$  and  $-42.2^\circ$  accordingly. All the fracture criteria tested give similar values of the crack growth angle for different values of the mixity parameter. It is shown that the initial crack propagation angles given by the both approaches are very close especially for the case when the higher order terms of the Williams series expansion for the stress/displacement field description are taken into account. Thus one can conclude that the criteria of classical continuum mechanics MTS and SED can give satisfactory predictions for crack initiation direction. The crack propagation direction angles given by the conventional fracture mechanics reasonably agree with the angles obtained from molecular dynamics simulations.

# КРУПНОМАСШТАБНАЯ СЛОЖНАЯ КОНВЕКЦИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛООБМЕНА ПО ЗАКОНУ НЬЮТОНА

Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.

*Институт Машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

В докладе приведены аналитические решения, описывающие крупномасштабные слоистые течения конвекции Бенара–Марангони [1] в несжимаемой вязкой жидкости. На границах слоя жидкости используется граничное условие третьего рода – закон теплопередачи по Ньютону.

Течение описывается уравнениями Обербека–Буссинеска [2]. Решение исходной системы представляется: для температуры и давления в виде линейной функции по координатам, для скоростей  $V_x$  и  $V_y$  – как функции координаты  $z$ , скорость  $V_z$  полагается равной нулю [3].

После подстановки представления решения в исходные уравнения получим краевую задачу для системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, решение которой получено аналитически.

Проведен анализ полученного решения. Показано, что существует толщина слоя жидкости, при которой касательные напряжения обращаются в нуль одновременно, что эквивалентно наличию растягивающих и сжимающих касательных напряжений.

## Литература

1. Бирих Р. В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости. // ПМТФ, 1966. № 3. С. 69–72.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т 6. Гидродинамика. Изд 6, М. : Наука, 2006. 736 с.
3. 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.
4. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарная сложная конвекция при граничных условиях III рода на границах слоя жидкости. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2016. – Iss. 2 URL: [http://dream-journal.org/issues/2016-2/2016-2\\_81.html](http://dream-journal.org/issues/2016-2/2016-2_81.html), С. 34–47.

## К ВОПРОСУ ЗАРОЖДЕНИЯ ОЧАГА РАЗРУШЕНИЯ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ

Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д.

*ФГБУН Институт механики УрО РАН, 34, Т. Барамзиной, г. Ижевск, 426067, Россия,  
e-mail: [oka592@rambler.ru](mailto:oka592@rambler.ru)*

При изучении проблем повышения долговечности вопрос о причинах зарождения очага разрушения полых пальцев при асимметричном знакопостоянном изгибе на внутренней поверхности изделий немаловажен. Анализ условий эксплуатации полых пальцев с толстенностью  $a = 0,5$  показал также, что уровень действующих напряжений на внутренней поверхности может быть выше, чем на наружной.

На рис. 1 представлены эпюры рабочей нагрузки и действующих напряжений в деталях при асимметричном цикле изгибного нагружения. Испытания на циклический изгиб полых деталей (валы, оси, пальцы) были проведены в ЦНИИ МПС и ВНИТИ Трубной промышленности, ОАО «НИИ стали» и показали: ни в одном случае не наблюдалось развития трещин с внутренней поверхности (со стороны отверстия) несмотря на то, что эта поверхность была необработанной и оставалась черной. Это объясняется, по-видимому, тем, что суммарные действующие напряжения на наружной поверхности пальцев, изготовленных ранее, были выше, чем на внутренней.

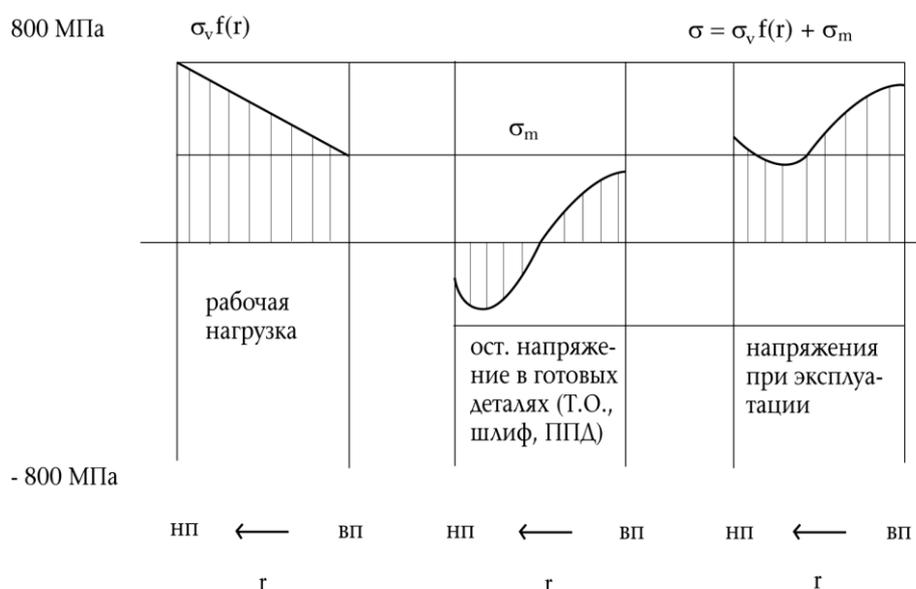


Рис. 1. Эпюры действующих напряжений при эксплуатации полых пальцев:  
НП – наружная поверхность; ВП – внутренняя поверхность;  
 $r$  – текущее значение радиуса

Однако проведенные ОАО «НИИ стали» циклические испытания полых пальцев, изготовленных по новой технологии, включающей операции металлургического цикла (прошивку и редуцирование) и последующее упрочнение высокотемпературной термомеханической обработкой (ВТМО) с деформацией винтовым обжатием в неприводной трехроликовой клетки и последующей обкаткой роликами показали во всех случаях расположение очага разрушения на внутренней поверхности (рис. 2). Представленная картина нагруженности пальца с учетом технологических остаточных напряжений (рис. 1), полученных в исследованиях, некоторым образом объясняет тенденцию зарождения очага разрушения (при испытаниях полых пальцев) на внутренней поверхности. Следует также учитывать, что горячекатаная трубная заготовка имеет широкий набор дефектов поверхности, заложенных операциями ме-

таллургического цикла (прошивка, редуцирование, отпуск при температуре  $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Эти дефекты удаляются полностью с наружной поверхности механической обработкой, однако дефекты внутренней поверхности трудноудаляемы и являются множественными концентраторами напряжений. Поэтому вопрос повышения качества внутренней поверхности и его влияние на долговечность деталей из горячекатаной толстостенной трубы рассмотрен достаточно подробно с целью выявления зависимости долговечности от физических и геометрических свойств поверхности [1]. Показано, что снижение шероховатости внутренней поверхности и полное удаление дефектного слоя (окалина, травильных и раскатных трещин, обезуглероженного слоя и т. п.) способствует увеличению долговечности полых деталей при асимметричном знакопостоянном изгибе от 2 до 5 раз.

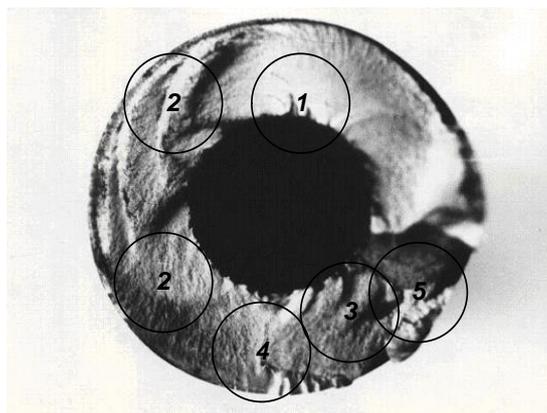


Рис. 2. Многоочаговое зарождение трещины на внутренней поверхности полого пальца, выдержавшего 305.000 циклов нагружения: 1 – зона зарождения и развития усталостной трещины; 2 – зона волокнистого излома; 3 – зона среза; 4 – зона шевронного или рубцового излома; 5 – зона хрупкого разрушения

Таким образом, в толстостенных полых деталях при ВТМО и последующей обкатке роликами возникают значительные остаточные напряжения, превосходящие остаточные напряжения в сплошных деталях того же диаметра, что связано с особенностями технологии упрочнения (ВТМО + обкатка роликами) и зависимостью формы эпюр от величины толстостенности [2]. С уменьшением толщины стенки наблюдается сжатие эпюр остаточных напряжений при общем их удлинении, характеризующем увеличение максимальных значений остаточных напряжений. При этом суммарный уровень напряжений при эксплуатации может быть выше на внутренней поверхности трубчатой детали. Применение горячекатаной трубной заготовки предполагает наличие дефектного слоя на внутренней поверхности глубиной до  $1...1,5\text{ мм}$  на трубах  $\text{Ø}22...30\text{ мм}$  с толщиной стенки  $5...10\text{ мм}$ . Отсюда становится возможным появление очага разрушения на внутренней поверхности. Одним из условий повышения долговечности полых деталей в этих условиях является полное удаление дефектов внутренней поверхности и ее упрочнение методами поверхностного пластического деформирования, совмещенными с ВТМО. Оптимальный диапазон отношения  $d/D$  с точки зрения возникающих при упрочнении остаточных напряжений и выполнения условий приближения к равнопрочности лежит в пределах  $0,4...0,6$ .

#### Литература

1. Дементьев В. Б., Шаврин О. И., Маслов Л. Н., Засыпкин А. Д. Качество пальцев траков – основа надежности и долговечности гусеницы. – Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2009. – 224 с. ISBN 978-5-89238-102-4.
2. Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д. Влияние остаточных напряжений на точность полых пальцев траков гусеницы при ВТМО с деформацией винтовым обжатием // Тракторы и сельхозмашины. № 12. 2012. С. 52–54.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В УПРУГОЙ ТРУБКЕ

Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.

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

Явление свободных колебаний вязкой жидкости в упруго деформируемых трубках могут присутствовать и наблюдаться в широком многообразии технологических процессов и разнообразных приборах. Очень часто эти явления происходят в поле силы тяжести. Именно эта ситуация имеет место в системах гидростатического нивелирования, которые используются для измерений наклонов и вертикальных перемещений в системах мониторинга конструкций и природных объектов. Этот метод измерения обладает рядом преимуществ: не требует обеспечения прямой видимости, обладает долговременной стабильностью, что важно для контроля объектов с большой базой, которая может достигать сотен метров.

В основе работы гидронивелиров лежит принцип сообщающихся сосудов. Вся система представляет разветвленную сеть протяженных, объединенных между собой трубок, заполненных вязкой жидкостью, находящейся в поле силы тяжести. Измерение вертикальных относительных перемещений осуществляется по изменению положения свободной поверхности жидкости в различных точках системы трубок. Важной технической характеристикой системы является частота свободных колебаний поверхностей жидкости и время затухания колебаний. Они определяют характерные времена изменений относительных перемещений, которые могут быть измерены системой гидронивелирования. В таких системах в качестве трубок удобно использовать гибкие упругие шланги. Способность трубки к упругому деформированию становится фактором, влияющим на значения параметров свободных колебания жидкости.

В статье предложена математическая модель, учитывающая влияние упругого деформирования стенок трубки на свободные колебания вязкой жидкости. Анализ результатов численных экспериментов позволил установить степень влияния упругого деформирования трубки на частоту вязкой жидкости, находящейся в поле силы тяжести. Проведены эксперименты по исследованию колебаний жидкости в нивелирах с трубкой различной жесткости и длины. Численные результаты сопоставлены с результатами физических экспериментов. Сопоставление установило работоспособность предложенной математической модели.

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

# МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ: К ОПИСАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ФОРМОВАНИЯ

Трусов П.В.<sup>1</sup>, Швейкин А.И.<sup>2</sup>, Янц А.Ю.<sup>3</sup>, Шарифуллина Э.Р.<sup>4</sup>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
29, Комсомольский пр-т, Пермь, 614990, Россия,*

*e-mail: <sup>1</sup>[tpv@matmod.pstu.ac.ru](mailto:tpv@matmod.pstu.ac.ru), <sup>2</sup>[shveykin@pstu.ru](mailto:shveykin@pstu.ru), <sup>3</sup>[maximus5.59@gmail.com](mailto:maximus5.59@gmail.com), <sup>4</sup>[elvira16\\_90@mail.ru](mailto:elvira16_90@mail.ru)*

Для совершенствования существующих и разработки новых методов термомеханической обработки необходимы математические модели материалов, способные описывать эволюцию структуры при деформировании и учитывать ее влияние на параметры процесса и эффективные свойства материала на макромасштабном уровне. Поэтому к настоящему времени значительное развитие получили многоуровневые модели поликристаллических металлов и сплавов [1, 2], базирующиеся на физических теориях упруговязкопластичности и включающие явное описание меняющейся структуры материала и механизмов деформирования на различных масштабных уровнях.

Поскольку для большинства процессов термомеханической обработки металлов и сплавов характерны большие градиенты перемещений, разрабатываемые модели материалов являются геометрически нелинейными. При использовании многоуровневого подхода на уровне кристаллитов для металлов возможно выделение симметричных элементов (кристаллографическое направление и кристаллографическая плоскость), с которыми предлагается связать движение жесткой системы координат, определяющей квазитвердое движение [3]. Тензоры свойств полагаются постоянными во введенной подвижной системе координат, при этом для наблюдателя в фиксированной лабораторной системе координат они изменяются как индифферентные, что позволяет выполнить принцип независимости определяющего соотношения от выбора системы отсчета. Для определения спина могут быть использованы любые физически обоснованные модели ротации (например, основанные на рассмотрении взаимодействия дислокаций и дисклинаций соседствующих кристаллитов [4]).

Сформулированы конститутивные упруговязкопластические соотношения в конечной и скоростной формах, включающие описание механизмов внутризеренного дислокационного скольжения и ротаций решеток кристаллитов, эквивалентные друг другу и связывающие меры напряженного и деформированного состояния, записанные в однозначно определяемой нагруженной решеточной конфигурации. Приведены приближенные конститутивные соотношения в актуальной конфигурации в скоростной форме, которые могут использоваться при описании технологических процессов термомеханической обработки с достижением больших упругопластических деформаций – аналитически и в численных примерах показано, что рассматриваемые формулировки моделей при любых нагружениях дают близкие результаты на макромасштабном уровне, в том числе – по характеристикам изменяющейся структуры.

Была предложена модификация статистической модели для учета зернограничного скольжения: соотношение для скоростей зернограничных сдвигов формулируется по аналогии с уравнением Орована, для определения скоростей относительных смещений кристаллитов по границам используется соотношение аррениусовского типа, при описании изменений критических напряжений для зернограничных сдвигов учитывается интрузия, взаимосвязь зернограничного скольжения с внутризеренным дислокационным скольжением и зернограничной диффузией.

Разработаны алгоритмы решения краевых задач, основанные на интегрировании разработанных двух- и трехуровневых моделей в процедуру метода конечных элементов, создан комплекс вычислительных программ, позволяющий исследовать процессы обработки материалов с анализом изменения структуры материала и его, эффективных физико-механических свойств. Исследованы некоторые процессы термомеханической обработки.

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

## Литература

1. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Статистические модели // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. № 4. – С. 17–28.
2. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Прямые модели // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. № 5. – С. 5–30.
3. Трусов П. В., Швейкин А. И. О разложении движения и определяющих соотношениях в геометрически нелинейной упруговязкопластичности кристаллитов // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т.19. – № 3. – С. 25–38.
4. Трусов П. В., Швейкин А. И., Нечаева Е. С., Волегов П. С. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 1. – С. 33–56.

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Шипачева Е.Н.<sup>1</sup>, Петунин А.А.<sup>1</sup>, Березин И.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уральский Федеральный Университет, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия,  
e-mail: [e.n.shipacheva@urfu.ru](mailto:e.n.shipacheva@urfu.ru)

<sup>2</sup>Институт машиноведения УрО РАН, 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская 34, Россия,  
e-mail: [berezin@imach.uran.ru](mailto:berezin@imach.uran.ru)

Описывается задача маршрутной оптимизации, возникающая при раскрое листовых материалов на машинах термической резки с ЧПУ [1, 2]. Специфика задачи заключается в том, что траектория резки не совпадает с контуром детали, инструмент перемещается по эквидистанте этого контура. Также при использовании стандартной техники резки «по замкнутому контуру» для каждого контура предусмотрена одна точка врезки и одна точка выключения инструмента. В общем случае для каждого контура может существовать континуальное множество потенциальных точек врезки. Необходимость соблюдения условий предшествования, согласно которым контур вырезается только тогда, когда вырезаны все контуры, вложенные в него. Решение задачи позволит значительно сократить время и стоимость листовой резки. Рассматриваемая задача по постановке аналогична обобщенной задаче коммивояжера с ограничениями в виде условий предшествования, обусловленных технологическими особенностями резки. Приведен некоторый вариант генетического алгоритма для решения описанной задачи, сравнение параметров разработанного генетического алгоритма для задачи, имеющей дополнительные ограничения и задачи без ограничений [3]. Постановка задачи заключается в следующем: необходимо вырезать  $N$  внешних и внутренних замкнутых контуров, представляющих размещение заготовок на материале таким образом, чтобы суммарный холостой путь режущего инструмента был минимальным [4]. Будем считать, что точки врезки для каждого контура выбираются из конечного набора потенциально возможных и точка выключения инструмента совпадает с выбранной точкой врезки.

Алгоритм реализован в среде Visual Studio на языке C#. Исходными данными при решении задачи является полученная ранее раскройная карта, которая представляет собой графический файл, содержащий информацию о геометрии вырезаемых заготовок и об их расположении на раскраиваемом материале. Раскройная карта, используемая для тестирования алгоритма, получена в САПР «Т-Flex» Раскрой, на карте в интерактивном режиме расставлены потенциальные точки врезки с учетом технологических ограничений. Параметрами данного варианта генетического алгоритма являются:  $m$  – мощность популяции, т. е. число входящих в нее индивидов;  $m_r$  – доля особей популяции, участвующих в скрещивании;  $m_d$  – доля особей популяции, к которым применяется оператор мутации;  $G$  – число поколений (число генераций алгоритма). Для анализа работы алгоритма были проведены вычислительные эксперименты. В качестве исходных данных были взяты раскройная карта, содержащая 56 деталей, 155 внутренних и внешних контуров. Для возможности тестирования была реализована дополнительная программа, позволяющая преобразовать входные данные исследуемой библиотеки (матрица расстояний) к виду, соответствующему входным данным задачи оптимизации маршрута инструмента (координаты точек).

### Литература

1. Chentsov P.A., Petunin A.A. IFAC-PapersOnLine, 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM, Troyes, 2016, edited by Alexandre Dolgui, Robert Grubbström, Dmitry Ivanov and Farouk Yalaouil, Vol. 49. Iss. 12, P. 645–650;
2. Chentsov A.G., Chentsov P.A., Petunin A.A., Sesekin A.N. IFAC-PapersOnLine, 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM, Troyes, 2016, edited by Alexandre Dolgui, Robert Grubbström, Dmitry Ivanov and Farouk Yalaouil, Vol. 49. Iss. 12, Vol. 49. Iss. 12, P. 640–644.

3. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning (Addison-Wesley Professional, 1989), p. 432.
4. Петунин А. А. О некоторых стратегиях формирования маршрута инструмента при разработке управляющих программ для машин термической резки материала // Вестник УГАТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. Т. 13, No. 2 (35), С. 280–286.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МУАРА

Королев А.П., Макарчук М.В., Дутов М.Н., Лоскутова А.Д.

ФГБОУ ВО «ТГТУ», ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Российская Федерация,  
e-mail: [korolevanpal@yandex.ru](mailto:korolevanpal@yandex.ru)

Исследование наноструктурных объектов направлено на установление связи между структурой и их свойствами. Принципиальные трудности экспериментальных исследований связаны с тем, что необходимо исследовать близкодействующие поля с квантовой структурой и малыми расстояниями между устойчивыми энергетическими состояниями, находящимися в пределах диапазона теплового фона.

В этой связи представляет интерес разработка методов исследования близкодействующих полей наноструктурных объектов, имеющих высокие топологические и энергетические разрешения [1].

*Ключевые слова: метод муара, нанообъекты, фрактальность*

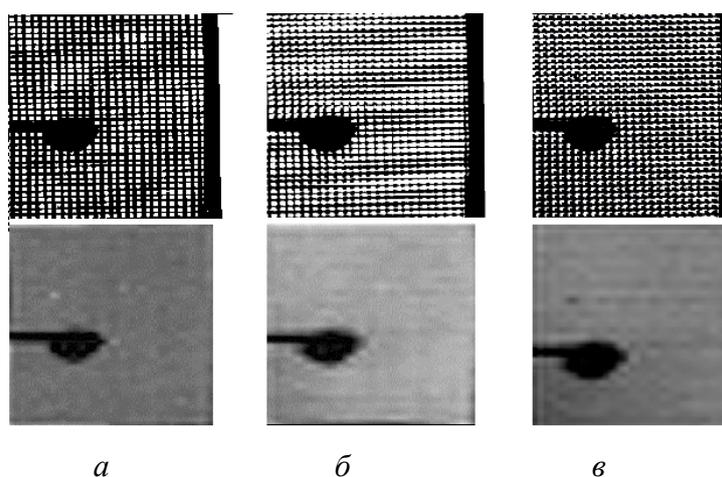
## 1. Материал и методика

Был разработан метод теневого электронно-оптического муара для выявления энергетических характеристик близкодействующих полей наноструктурных объектов при определенных условиях.

Получены соотношения, позволяющие определять напряженность электрического поля в любой его точке в зависимости от величины смещения элементов сетки, т. е. устанавливает связь между параметрами поля и особенностями создающего это поле наноструктурного объекта.

Таким образом, возможно по напряженности поля в различных точках и его конфигурации исследовать свойства наноструктурных объектов. Однако это длительный и трудоемкий процесс и при определении принадлежности воздействия результат может быть неоднозначен, особенно при смешанном воздействии со стороны различных объектов.

Для анализа полученных муаровых изображений (рисунков) рационально использовать методы математической обработки, включающие в себя: кластеризацию, сегментацию, вейвлет и фрактальный анализы.



Теневое изображение сетки (проекция) области сферического электрода и их изображения после вейвлет анализа: *a* – без потенциала на электродах; *b* – экспонирование изображения сетки с потенциалом на электродах на экспонированное изображение неискаженной сетки (двойное экспонирование); *c* – результирующее вычитания *b* из *a*

При обработке муаровых изображений необходимо выявить отличия между участками и систематизировать их; найти связь между энергетическим и топологическим строением нанообъектов [2, 3] и участками муарового изображения.

В качестве пробных предварительных исследований муаровых изображений применили метод вейвлет анализа, который позволяет найти связь между близкодействующими полями наноструктурных объектов и муаровых изображений.

Изображение после вейвлет анализа на рис. 1 *в* является разностью изображений, приведенных на рис. 1 *а, б*.

Последующая обработка включала построение гистограмм зависимости соотношения площадей с различной яркостью (градаций серого). С учетом выбранных пороговых значений строили сегментированные изображения, по которым осуществляли расчет фрактальных размерностей.

## 2. Выводы

Таким образом, проведены исследования и предложена методика описания электронно-оптических изображений, отражающих воздействие электромагнитных полей малой протяженности от нанообъектов. Предположительно возможна идентификация нанообъектов по величине их показателей фрактальности.

## Литература

1. Дутов М. Н. Эффективный метод исследования полей наноструктурных объектов / М. Н. Дутов, М. В. Макаrchук, А. П. Королев // Тезисы докладов 2-ой Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», 2015. – С. 307–308.
2. Королев А. П. Porous silicon is for environmental monitoring / А. П. Королев, М. В. Макаrchук, Н. Б. Бадирова, В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов // Материалы Международной научно-практической конференции, 2016. – 159–163 с.
3. Korolev A.P., Shelochvostov V.P., Chernyshov V.N. Solid State Primary Initial Transformer Design for Heat Values Measurement. Вестник Тамбовского государственного технического университета, 1999. Т. 5. № 4. С. 536–542.

## МНОГОУРОВНЕВОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

Курмоярцева К.А.<sup>1</sup>, Котельникова Н.В.<sup>2</sup>, Трусов П.В.<sup>3</sup>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
29, Комсомольский пр-т, Пермь, 614990, Россия,  
e-mail:<sup>1</sup>[kurmoiartseva.k@mail.ru](mailto:kurmoiartseva.k@mail.ru), <sup>2</sup>[kotelnickova@gmail.com](mailto:kotelnickova@gmail.com), <sup>3</sup>[tpv@matmod.pstu.ac.ru](mailto:tpv@matmod.pstu.ac.ru)*

В процессах создания и эксплуатации деталей и конструкций материалы, из которых они изготовлены, испытывает значительные изменения внутренней структуры. Для совершенствования существующих и разработки новых методов прогнозирования эволюции внутренней структуры в процессе деформирования необходимо учитывать процессы накопления поврежденности материала. Для корректного описания подобных процессов и их неоднородности требуется исследовать соответствующие физические механизмы и поведение материала на более низких, чем макроуровень, масштабных уровнях. После этого необходимо строить математические модели, способные описывать эволюцию структуры при деформировании с учетом самоорганизации микроструктурных процессов и связи микроструктуры с эффективными свойствами материала на макромасштабном уровне.

Процесс накопления поврежденности в поликристаллических материалах является многостадийным и многоуровневым процессом накопления микро- и мезодефектов. При этом на каждом масштабном уровне существуют различные физические механизмы накопления поврежденности – от образования зародышевых трещин до прорастания магистральной трещины. Одним из наиболее перспективных направлений для описания таких процессов представляется построение многоуровневых моделей, в основе которых лежит физическая теория упруговязкопластичности с явным описанием меняющейся структуры материала.

Цель проводимого авторами исследования – разработка математической модели для анализа поведения поликристаллических материалов, позволяющей описывать процессы накопления поврежденности в металлах и сплавах в широком диапазоне изменения параметров термомеханических воздействий, без априорного «навязывания» определенной моды разрушения на макроуровне. При этом в рассмотрение необходимо включить как диффузионные, так и дислокационные процессы зарождения микропор и микротрещин и увеличение их количества и размеров (накопление повреждений) с дальнейшим слиянием микроповреждений и образованием макроскопической трещины и ее роста. Предполагается, что определяющую роль в процессе разрушения играет неупругая деформация, и образование микротрещин происходит за счет взаимодействия дислокаций разных систем скольжения, дислокационных барьеров, границ и включений вторичной фазы [1].

Конститутивные соотношения разрабатываемой модели сформулированы в скоростной форме, включают уравнения для описания эволюции плотностей мобильных и иммобильных дислокаций и механизмов дислокационного зарождения микротрещин. В структуре разрабатываемой модели выделены макроуровень, мезоуровень – I и мезоуровень – II. На макроуровне (уровне поликристаллического агрегата) осуществляется описание деформирования материала в терминах несимметричной индифферентной меры скорости деформации. Мезоуровень – I (уровень зерен, субзерен) служит для описания процессов пластического деформирования за счет скольжения краевых дислокаций. Соотношение для определения скорости сдвига формулируется по аналогии с уравнением Орована (с учетом дислокаций разных знаков в каждой системе скольжения). Кроме того, записываются эволюционные уравнения для плотностей и скоростей движения дислокаций, скоростей сдвига, действующих и критических сдвиговых напряжений для каждой системы скольжения с учетом плотностей мобильных и иммобильных дислокаций, источников дислокаций и барьеров, а также процессов аннигиляции, мобилизации и иммобилизации. Мезоуровень – II (уровень частей зерен и субзерен) введен для рассмотрения накопления поврежденности и эволюции плотностей дислокаций. В качестве основы модели мезоуровня – II использованы кинетические

уравнения, описывающие изменение плотностей дислокаций на системах скольжения, и соотношения дислокационной теории разрушения. Плотности различных типов дислокаций полагаются в пределах этого уровня равномерно распределенными. При этом для описания процесса накопления повреждений анализируется взаимодействие дислокаций разных плоскостей скольжения.

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

#### Литература

Иванова В. С., Гордиенко Л. К., Геминев В. Н. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов. – М. : Наука, 1965. – 180 с.

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПКМ-ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

Сероваев Г.С.<sup>1</sup>, Кошелева Н.А.<sup>1</sup>

*ИМСС УрО РАН, 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Россия,  
e-mail: serovaev@icmm.ru*

Сочетание полимерных композитных материалов (ПКМ) и оптических волокон имеет большие перспективы для создания надежных конструкций, обладающих возможностью оценки механического состояния в процессе эксплуатации. Среди основных преимуществ ПКМ можно выделить: высокую удельную прочность композитных материалов, широкий контролируемый диапазон получаемых механических свойств, организацию различных схем укладки, плетения, большой выбор армирующих волокон и связующего. Волоконно-оптические датчики отлично подходят для организации измерительной системы композитных материалов благодаря малым размерам, точности измерений и возможности размещения оптических волокон на поверхности исследуемого объекта и при встраивании внутрь структуры ПКМ.

Одним из основных вопросов, возникающих при оценке механического состояния конструкции с помощью оптических волокон, является соответствие измеряемых деформаций в оптическом волокне действительным деформациям в композитном материале. Хорошо известно, что при измерении деформаций на поверхности материала, на качество передачи деформаций влияет толщина клея и его свойства. В зависимости от этих параметров изменяется размер зоны несоответствия деформаций в оптическом волокне и в композитном материале в области границ приклейки. При встраивании оптического волокна между слоями композитного материала также возникает зона несоответствия деформаций в области вывода оптического волокна, размер которой зависит от соотношения модулей композитного материала и оптического волокна. Целью работы является изучение таких зон несоответствия деформаций, их размеров и анализ параметров, влияющих на особенности напряженно-деформированного состояния системы ПКМ-оптическое волокно.

Вопросам, связанным с качеством передачи деформаций на оптическое волокно посвящен ряд работ. Авторами работы [1] было теоретически и экспериментально показано, как волоконно-оптические брэгговские решетки (ВБР) могут быть использованы в качестве ценного инструмента при мониторинге композитных структур в процессе эксплуатации, а также для регистрации внутренних напряжений и деформаций в слоистых материалах. Экспериментально было найдено и теоретически обосновано, что поперечная нагрузка на датчик приводит к разделению отраженного спектра на два пика, а ширина полосы между этими пиками содержит информацию о поперечной деформации. В [2] была разработана аналитическая модель связующего слоя для ВБР на подложке для прогнозирования переноса деформации с подложки на ВБР, в то время когда подложка находится под внешним воздействием. Результаты работы показывают влияние связующего слоя на перенос деформации от подложки к ВБР, сказывающееся на отраженном спектре.

Настоящая работа посвящена численному изучению соответствия деформаций, реализующихся в оптическом волокне и деформаций в композитном материале при расположении датчика в однородном и градиентном полях деформаций, а также в зоне вывода оптического волокна из материала. В результате проведенного исследования получены геометрические параметры зон несоответствия деформаций в зависимости от отношения модулей упругости системы «ПКМ – оптическое волокно». Результаты позволяют сделать выводы о характере переноса деформаций от композитного материала к оптическому волокну, что позволяет дать рекомендации об оптимальном расположении датчиков на оптическом волокне.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-41-590684 п\_а).*

## Литература

1. Guemes J., Менйндез J., “Response of Bragg grating fiber-optic sensors when embedded in composite laminates,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 62 (7), pp. 959–966, 2002.
2. Cheng C., Lo Y., Pun B., Chang Y., Li W., “An investigation of bonding-layer characteristics of substrate-bonded fiber Bragg grating,” *J. Light. Technol.*, vol. 23(11), pp. 3907–3915, 2005.

# ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СЛАУ ПРИ РЕШЕНИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ НА ГЕТЕРОГЕННОЙ КЛАСТЕРНОЙ СИСТЕМЕ

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

ИМАШ УрО РАН, 34, Компосольская, Екатеринбург, 620049, Россия,  
e-mail: me@dijkstra.ru

Моделирование больших упругопластических деформаций методом конечных элементов требует решения ряда систем алгебраических уравнения (СЛАУ) большой размерности. Решение СЛАУ является вычислительно сложным этапом и сравнительно плохо поддается параллельной реализации. Решение СЛАУ в трёхмерных задачах с мелким разбиением сетки, например, возникающих при моделировании процесса деформирования представительных объёмов композиционных материалов, может занимать десятки и сотни часов. Как правило, для решения таких задач используется предобусловленные итерационные методы, основанные на подпространствах Крылова. Сходимость таких методов сильно зависит от спектра оператора матрицы жёсткости. С целью выбора подходящего метода необходимо производить ряд вычислительных экспериментов. Кроме того, методы решения СЛАУ по-разному подходят для использования на различных вычислительных системах.

В ходе работы было проведено сравнительное численное экспериментальное исследование времени работы ряда итерационных методов CGS, TFQMR, BiCGStab и GMRES решения СЛАУ при решении методом конечных элементов модельной упругопластической задачи сжатия параллелепипеда плоскими плитами с большими пластическими деформациями. Эксперименты выполнены на кластерном суперкомпьютере с графическими ускорителями Института математики и механики УрО РАН. Результаты вычислительных экспериментов приведены в таблице.

Общее время работы для различных реализаций методов  
в зависимости от количества процессоров  $p$

$p$	CGS	TFQMR	BiCGStab	GMRES
4	6256	6118	6531	23853
6	4327	4226	4668	13488
8	4697	4587	5539	17073

Результаты показывают, что методы CGS и TFQMR имеют меньший разброс значений. Отличия во времени их работы вызваны особенностями векторов начальных приближений. Вычислительные эксперименты показали хорошую воспроизводимость последовательных запусков в пределах одинаковых узлов. Хотя для некоторых шагов метод BiCGStab показывает наименьшее время работы, относительно малораспространённые методы TFQMR и CGS показывают наилучший суммарный результат. Исследуемые реализации методов хуже масштабируются в сравнении с реализациями для гомогенной кластерной системы<sup>1</sup>, однако позволяют решать задачи с большими сетками, одновременно используя 6 ускорителей. Реализации, основанные на CUDA и OpenCL, имеют одинаковую масштабируемость. Это связано с тем, что наиболее «узким» местом реализации является обмен сообщениями между ускорителями. Для рассматриваемой вычислительной системы и рассматриваемого класса задач наиболее эффективным методом решения СЛАУ являются методы квадратичных сопряжённых градиентов (CGS) и квазиминимальных невязок (TFQMR), при этом метод TFQMR является предпочтительным.

*Данная работа частично поддержана Комплексной программой УрО РАН (проект 15-7-1-17) в части исследования алгоритмов для моделирования процессов больших упругопластических деформаций металлов, а также частично поддержана РНФ (14-19-01358) в части создания конечно-элементного комплекса для моделирования представительных объёмов композитных материалов.*

<sup>1</sup>AIP Conference Proceedings 1785, 040023 (2016); <http://doi.org/10.1063/1.4967080>

# ОПИСАНИЕ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ В СЛУЧАЕ БОЛЬШИХ ГРАДИЕНТОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ: О ФИЗИЧЕСКОМ СМЫСЛЕ СКАЛЯРНОЙ МЕРЫ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Янц А.Ю.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Определяющее соотношение любой модели механики деформируемой сплошной среды устанавливает связь между откликом и воздействием. Под откликом обычно понимается некоторая мера напряжений, а под воздействием – мера деформированного состояния или их скоростные аналоги. Меры напряжений имеют вполне прозрачный физический смысл – вектор усилий, отнесенный к площадке, где усилия и площадка определены в тех или иных конфигурациях. Геометрический смысл мер деформированного состояния (и их скоростей) определяется через изменение длин и углов между некоторыми отрезками. В классической теории сплошной среды существует два подхода к введению мер деформированного состояния. Первый основывается на введении метрического тензора, второй – на использовании градиента места [1]. В настоящее время в подавляющем большинстве моделей механики деформируемого тела используются меры деформаций, построенные на основе градиента места; компоненты таких мер имеют ясный геометрический смысл.

В ряде макрофеноменологических моделей (в качестве параметров), а также в методах обработки экспериментов используются скалярные меры деформированного состояния. Использование вместо тензорных величин скалярных аналогов отчасти оправдано в случае простых нагружений (растяжение/сжатие и сдвиг) и упрощает анализ результатов экспериментов и расчетов путем построения зависимостей скалярных напряжений от деформаций. Для таких зависимостей при умеренных накопленных деформациях ( $< 1\%$ ) была выдвинута гипотеза о единой кривой нагружения, подразумевающая одинаковую зависимость интенсивности напряжений от интенсивности (накопленных) деформаций для материала при произвольных процессах нагружения. Однако в случае больших деформаций, даже для простых нагружений, данная гипотеза не выполняется, что подтверждается результатами экспериментальных исследований [2, 3], а также результатами численного моделирования [3–6], где количественное расхождение значений интенсивностей напряжения могут достигать 20 % для одинаковых значений интенсивностей накопленных деформаций при различных видах нагружения (растяжение, сдвиг или кручение).

Стоит обратить внимание на то, что в выборе скалярной меры деформаций имеет место некоторый произвол, ограниченный тем, что данная величина должна быть инвариантна относительно выбора системы координат и в случае одноосного деформирования и простого сдвига интенсивность деформаций должна равняться соответственно относительному удлинению (сжатию) и сдвигу. В случае произвольного деформирования принято использовать в качестве скалярной меры интенсивность деформаций, однозначно выражаемую через второй инвариант меры деформаций.

В работе сделана попытка введения скалярных мер деформированного состояния на основе рассмотрения механизмов и процессов, протекающих на нижележащих масштабных уровнях в кристаллических металлах и сплавах. В качестве модели материала была использована упруговязкопластическая модель физической теории пластичности [7, 8].

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

## Литература

1. Поздеев А. А., Трусов П. В., Няшин Ю. И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. – М. : Наука. 1986. 232 с.
2. Bronkhorst C.A., Kalidindi S.R., Anand L., Polycrystalline plasticity and the evolution of crystallographic texture in f.c.c. metals // *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A* 341. 1992. P. 443–477.
3. Томй, С., Canova, G.R., Kocks, U.F., Christodoulou, N., Jonas, J.J. The relation between macroscopic and microscopic strain hardening in F.C.C. polycrystals // *Acta Metall.* 32 (10), 1984. P. 1637–1653.
4. Anand L. Single-crystal elasto-viscoplasticity: application to texture evolution in polycrystalline metals at large strains// *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 193. 2004. P. 5359–5383.
5. Kocks U.F., Mecking H. Physics and phenomenology of strain hardening: the FCC case // *Progress in Materials Science*, 48. 2003. P. 171–273.
6. S. Mahesh A hierarchical model for rate-dependent polycrystals // *International Journal of Plasticity*, 25. 2009. P. 752–767.
7. Трусов П. В., Нечаева Е. С., Швейкин А. И. Применение несимметричных мер напряженного и деформированного состояния при построении многоуровневых конститутивных моделей материалов// *Физическая мезомеханика*. – Томск : ИФПМ СО РАН, 2013. – Т. 16, № 2. – С. 15–31.
8. 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.

# ESTIMATION OF THE CRACK PROPAGATION DIRECTION ANGLE FOR TWO COLLINEAR CRACKS OF DIFFERENT LENGTHS IN INFINITE PLANE

Stepanova L.V.

*Department of Mathematical Modeling in Mechanics, Samara University,  
Moskovskoe shosse, 34, Samara 443086, Russia Federation,  
e-mail: [stepanovaLv@samsu.ru](mailto:stepanovaLv@samsu.ru)*

The paper discusses the multi-parameter description of the stress fields in the vicinity of two collinear cracks of different lengths in an infinite isotropic elastic medium subjected to Mixed (Mode I and Mode II) mode loading. The multi-parameter asymptotic expansions of the stress field containing the higher-order terms are obtained. The amplitude coefficients of the multi-parameter series expansion are found in the closed form. Having obtained the coefficients of the Williams series expansion one can keep any preassigned number of terms in the asymptotic series. Asymptotic analysis of number of the terms in the Williams asymptotic series which is necessary to keep in the asymptotic series at different distances from the crack tip is given. It is shown that the more distance from the crack tip the more terms in the Williams asymptotic expansion need to be kept. The estimation of the crack propagation direction angle is given. The crack propagation direction angle for different values of the mixity parameter is found by the use of 1) maximum tangential stress criterion; 2) minimum elastic strain energy density criterion. It is shown that the higher-order terms of the Williams series expansion effect on the crack propagation direction angle.

In this paper the MTS and SED approaches are applied to obtain the crack propagation direction angle in the infinite plane with two collinear cracks of different lengths under mixed mode loading. The crack propagation angle is obtained by the generalized multi-parameter fracture mechanics approach based on two fracture mechanics criteria, MTS and SED. It is shown that the initial crack propagation direction angles given by the both approaches are very close especially for the case when the higher order terms in the WE are kept. The study shows that more than one or two terms should be taken into account. The multi-parameter fracture mechanics approach is necessary especially when the stress field is influenced when the stress field is investigated at larger distances from the crack tip.

# ОБОБЩЕННЫЕ КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

Степанова Л.В.

*Кафедра математического моделирования в механике,  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,  
Московское шоссе, 34, Самара 443086, Россия,  
e-mail: [stepanovaLv@samsu.ru](mailto:stepanovaLv@samsu.ru)*

Работа посвящена многопараметрическому асимптотическому описанию поля напряжений у вершины центральной трещины в линейно упругой изотропной пластине, находящейся 1) под действием нормального растягивающего напряжения; 2) поперечного сдвига; 3) в условиях смешанного деформирования в полном диапазоне смешанных форм нагружения, изменяющихся от чистого нормального отрыва до чистого поперечного сдвига. Построено многопараметрическое асимптотическое разложение компонент тензора напряжений, содержащее высшие приближения, в котором аналитически определены все масштабные (амплитудные) множители – коэффициенты полного асимптотического разложения М. Уильямса – как функции длины трещины и параметров нагружения. С помощью построенного разложения и полученных формул для коэффициентов разложения можно удерживать любое, наперед заданное число слагаемых в асимптотических представлениях механических полей у вершины трещин в пластине. Проведен анализ числа слагаемых, которое необходимо удерживать на различных расстояниях от кончика дефекта. Вычислены углы распространения трещины в условиях смешанного нагружения с помощью многопараметрического разложения поля напряжений посредством 1) критерия максимального тангенциального напряжения; 2) критерия минимума плотности энергии упругой деформации. Полученное асимптотическое разложение, амплитудные коэффициенты разложения и проведенный анализ может быть полезен для цифровой обработки данных оптоэлектронных измерений методами фотоупругости, голографической интерферометрии, спекл-интерферометрии и цифровой корреляции изображений, которые в настоящее время приобрели большое значение. При обработке экспериментальных данных, например, полученных с помощью метода фотоупругости, возникают сложности вычислительного характера, связанные с решением системы нелинейных алгебраических уравнений, следующих из основного закона фотоупругости, – закона Вертгейма, который применяют для экспериментального определения коэффициентов полного асимптотического разложения М. Уильямса. Для получения надежных результатов оказывается необходимым иметь аналитические оценки для амплитудных (масштабных) множителей – коэффициентов асимптотического разложения [1, 2]. Поэтому полученное решение позволяет экспериментатору для правильной обработки всей совокупности экспериментальной информации 1) обоснованно выбрать количество удерживаемых слагаемых в разложении Уильямса; 2) сопоставить экспериментально определенные множители с найденными теоретически.

## Литература

1. Stepanova L., Roslyakov P. Multi-parameter description of the crack-tip stress field: Analytic determination of coefficients of crack-tip stress expansions in the vicinity of the crack tips of two finite cracks in an infinite plane medium. *International Journal of Solids and Structures* 100–101, 11–28 (2016).
2. L Stepanova L., Roslyakov P. Complete asymptotic expansion M. Williams near the crack tips of collinear cracks of equal lengths in an infinite plane medium. *PNRPU Mechanics Bulletin* 4, 188–225 (2015).

## МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛОПОЛИМЕРНОЙ ТРИБОСИСТЕМЫ

Колесников И.В., Сидашов А.В.

ФГБОУ ВО РГУПС «Ростовский государственный университет путей сообщения»  
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, Россия,  
e-mail: [sav\\_teor\\_meh@rgups.ru](mailto:sav_teor_meh@rgups.ru)

Представлены результаты обменно-диффузионных процессов химическими элементами в металлополимерных трибосистемах (между металлическим колесом подвижного состава и композиционной полимерной тормозной колодкой). С помощью квантово-химических расчетов, оже- и рентгеноэлектронной спектроскопией оценено влияние сегрегационных процессов на прочностные характеристики рабочей поверхности трибосистемы.

Для исследования из колеса и его отделившихся фрагментов износа были подготовлены образцы. Методом оже- и рентгеноэлектронной спектроскопии было обнаружено, что на сколах и на поверхностях дефектных участков присутствуют атомы следующих элементов: Fe (железная матрица), примеси серы и фосфора, легирующие элементы C, Cu, Mn, Cr, Si, элементов, не принадлежащих материалу колеса K, Ca, Ba, Zn. Элементы, обнаруженные на поверхности катания колеса, имеют разные источники, например атомы Ba и Zn – из тормозной колодки. Атомы калия и кальция содержатся как в окружающей среде, так и в материале колеса. Кроме того, в продуктах износа отмечено повышение содержания углерода. Основным итогом исследований заключается в том, что на поверхности продуктов износа колеса количество легирующих и примесных элементов значительно превышает их исходную концентрацию. Последнее свидетельствует о протекании интенсивных диффузионных процессов в неравновесной системе пар трения, приводящих к перераспределению химических элементов в системе. Сегрегированные атомы на границах зерен могут существенно влиять на прочностные характеристики материалов в результате замены связи между атомами металла на более сильную или более слабую связь «металл–сегрегированный атом». В подтверждение такой точки зрения проведена оценка энергии, достаточной для разрыва связи между зернами, с помощью квантово-химических расчетов.

Дополнительно были проведены исследования физико-механических характеристик образцов, вырезанных из исследуемого материала колеса на разных расстояниях от нормали к поверхности. Установлено, что значение временного сопротивления на разрыв образцов, содержащих поверхностный слой катания колеса ( $\sigma_b = 920$  МПа) ниже, чем значения для образцов, удаленных от поверхности слоя ( $\sigma_b \approx 1$  ГПа).

### Выводы

Из квантово-химических расчетов следует, что одни сегрегированные атомы (бор, ванадий, хром) упрочняют связи между кристаллитами в железе, а другие атомы (магний, сера, фосфор, цинк) способствуют их разупрочнению, что обусловлено значением энергии, требуемой для распада сегрегационных комплексов. Эти результаты соответствуют эмпирической информации о свойствах элементов.

Анализ данных по примесному составу рабочей поверхности железнодорожного колеса, отслужившего срок эксплуатации, и кривых распределения механических характеристик по глубине колеса (временное сопротивление и модуля Юнга) показало, что наличие примесных элементов в поверхностных слоях колеса ухудшает его механические характеристики.

*Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00116) в Ростовском государственном университете путей сообщения.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Кондратьев Н.С.<sup>1</sup>, Макаревич Е.С.<sup>2</sup>, Няшина Н.Д.<sup>3</sup>, Янц А.Ю.<sup>4</sup>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,*

*29, Комсомольский пр-т, Пермь, 614990, Россия,*

*e-mail: <sup>1</sup>[kondratevns@gmail.com](mailto:kondratevns@gmail.com), <sup>2</sup>[makareviches@inbox.ru](mailto:makareviches@inbox.ru),*

*<sup>3</sup>[nnd73@perm.ru](mailto:nnd73@perm.ru), <sup>4</sup>[maximus5.59@gmail.com](mailto:maximus5.59@gmail.com)*

В настоящее время актуальной задачей механики деформируемого твердого тела является построение моделей для описания неупругого деформирования, в которых явным образом учитываются физические механизмы и процессы неупругого деформирования, реализующиеся в поликристаллических материалах [1]. Под структурой, прежде всего, понимается зеренная (размеры, ориентация, топология зерен, включая границы) структура мезоуровня и дефектная (дислокационная) структура микроуровня. Интенсивные пластические деформации или термические воздействия приводят к существенной перестройке (эволюции) структуры, которая в конечном итоге определяет макрохарактеристики материала [2]. Более широким и гибким по возможностям формирования структуры является одновременное использование механических и термических воздействий – термомеханическое нагружение. В результате такой обработки металлов и сплавов реализуется широкий спектр механизмов неупругого деформирования и процессов, его сопровождающих. Пластическое деформирование в основном обусловлено скольжением краевых дислокаций, при повышенных температурах – неконсервативным движением (переползанием). При затруднении скольжения дислокаций неупругое деформирование осуществляется путем двойникования. Двойники появляются в материалах с ограниченным набором «легких» систем скольжения (кристаллы с гексагональной плотноупакованной решеткой) и низкой энергией дефекта упаковки. Последнее обстоятельство связано с физическими причинами двойникования, обусловленными наличием расщепленных (двойникоующих) дислокаций в кристаллах. Расщепленные дислокации также являются причиной появления прочных дислокационных барьеров и последующего «запираания» систем скольжения. Для некоторых поликристаллических материалов (например титановых сплавов) придание нужной формы при холодном деформировании практически невозможно, а при повышенных температурах проходят процессы, существенным образом видоизменяющие зеренную и дефектную структуру, – возврат, рекристаллизация, фазовые переходы. Роль возврата в формировании дефектной структуры особенно велика в материалах с высокой энергией дефекта упаковки. В этом случае практически отсутствуют расщепленные дислокации, что облегчает полигонизацию и последующую фрагментацию зерен с аннигиляцией дислокаций внутри фрагментов. Продолжающиеся интенсивные пластические деформации ведут к развороту бездефектных (в результате процесса возврата) фрагментов, образуя мелкозернистую структуру с высокоугловыми границами. Такие зерна при определенных условиях по температуре и скоростям нагружения могут расти вглубь более дефектных соседних зерен за счет миграции границы, либо испытывать межзеренное скольжение. Рекристаллизация может проходить другим образом – новые бездефектные зерна зарождаются в областях существенных искажений кристаллической решетки (границы зерен, двойников, полосы сдвига) в результате тепловых флуктуаций. Вновь образованное малодефектное зерно при произвольной ориентации относительно соседних зерен (с большеугловыми границами) способно к дальнейшему продолжительному росту. Другим важным процессом высокотемпературного деформирования с точки зрения формирования зеренной и дефектной структуры являются фазовые превращения. Морфология (форма, размеры зерен и их границ) остаточной фазы зависит в основном от скорости охлаждения и величины деформации.

Цель работы – разработка и реализация многоуровневой физической модели, в основу которой положено корректное описание вышеупомянутых механизмов и процессов неупругого деформирования. Разработаны программы, реализующие алгоритмы решения краевых задач, основанные на методе конечных элементов. Проанализирована дефектная и зеренная структура в некоторых процессах термомеханической обработки.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60002 мол\_а\_дк.*

#### Литература

- 1) Трусов П. В., Швейкин А. И., Нечаева Е. С., Волегов П. С. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. № 1. – С. 33–56.
- 2) Трусов П. В., Ашихмин В. Н., Волегов П. С., Швейкин А. И. Определяющие соотношения и их применение для описания эволюции микроструктуры // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. № 3. – С. 61–71.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИНЫ В МАТРИЦЕ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ СО СЛУЧАЙНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА XFEM

Шалимов А.С., Ташкинов М.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
29, Комсомольский пр., Пермь, 614990, Россия,  
e-mail: [neilcrite@gmail.com](mailto:neilcrite@gmail.com), [m.tashkinov@pstu.ru](mailto:m.tashkinov@pstu.ru)*

При изучении механического поведения неоднородных материалов со сложной структурой важно учитывать влияние микромасштабных особенностей. В частности, моделирование таких процессов, как образование и рост трещины, является применительно к ним более сложной задачей по сравнению с однородными материалами. Возникает необходимость учитывать межфазные взаимодействия, а также морфологию структуры, поскольку неоднородности структуры, их распределение, геометрические и механические свойства зачастую оказывают ключевое влияние на параметры деформирования и разрушения материалов. При применении метода конечных элементов для анализа представительных объемов неоднородных структур существует ряд характерных сложностей, таких как разбиение сетки в окрестностях неоднородностей, а также, в случае роста трещины, сгущение и перестроение сетки вблизи фронта трещины. В результате модель разрушения становится, зависима от особенностей численной реализации, а при сложной начальной конфигурации представительного объема может стать недостаточно эффективной с точки зрения вычислительных ресурсов. В связи с этим актуальным становится разработка и реализация моделей, в основе которых лежат теоретические и численные подходы, позволяющие избежать обозначенных сложностей.

Данная работа посвящена развитию моделей разрушения полидисперсных матричных неоднородных сред со случайным расположением включений при помощи расширенного метода конечных элементов (XFEM). В соответствии с данным методом, рост трещины описывается специальными обогащенными функциями в сочетании с дополнительными степенями свободы. Преимущество метода XFEM заключается в том, что этот подход не обязательно предполагает соответствие границ трещин границам конечных элементов.

Рассмотрен частный случай неоднородного материала с пористыми сферическими включениями. Создана трехмерная конечно-элементная модель представительного объема. Исследовано влияние концентраторов напряжений в виде особенностей неоднородной микроструктуры на процесс распространения трещины при растяжении. Моделирование развития трещины выполнено в прикладном пакете Abaqus.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-01-00327\_а), а также гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2395.2017.1).*

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ СТАЛИ 08Г2БМ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Смирнов С.В.<sup>1</sup>, Хотинев В.А.<sup>2</sup>, Вичужанин Д.И.<sup>1</sup>,  
Полухина О.Н.<sup>2\*</sup>, Фарбер В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия,  
e-mail: [o.polukhina90@yandex.ru](mailto:o.polukhina90@yandex.ru)

Современное испытательное оборудование для проведения механических испытаний позволяет автоматизировать процесс получения и обработки измеряемых данных, а также получать принципиально новую информацию о свойствах материалов.

Так, в последнее время при испытаниях на растяжение активно используется метод корреляции цифровых изображений КЦИ (digital image correlation DIC), позволяющий на основе измерения полей перемещений материальных точек на поверхности образца проводить анализ поведения металла на разных стадиях деформации.

Цель настоящей работы – изучение особенностей пластического течения низкоуглеродистой микролегированной стали 08Г2БМ при растяжении с использованием метода корреляции цифровых изображений.

Диаграмма растяжения образца имеет вид гладкой параболической кривой ( $\sigma_{0,2} = 610$  МПа,  $\sigma_b = 670$  МПа,  $\delta = 12,5$  %). При этом с помощью метода КЦИ можно проследить пластическое течение металла на всех стадиях кривой растяжения. Так, при переходе от упругой к пластической деформации ( $\delta = 0,2$  %) смещения компоненты продольной деформации на поверхности металла крайне малы  $\varepsilon_{yy} = 0,4 \dots 0,6$  % и наблюдаются по всей длине образца.

С ростом деформации область пластического течения начинает сужаться (до 40 мм) при одновременном повышении  $\varepsilon_{yy}$  в эпицентре до  $3,0 \dots 4,0$  % и плавном переходе к периферии. Такое поведение характерно для исследуемого образца на всем протяжении равномерной стадии деформации вплоть до момента, пока в центре образца не станет заметно формирование концентратора деформации. При этом пластическое течение металла около концентратора происходит наиболее интенсивно ( $\varepsilon_{yy} = 5 \dots 6$  %). Дальнейшая деформация образца приводит к ее дальнейшей локализации в области шейки.

Проследить продольную деформацию в растягиваемом образце позволяет и анализ профилей полей деформаций  $\varepsilon_{yy}$  вдоль оси растяжения. Начало пластического течения характеризуется ростом  $\varepsilon_{yy}$  до  $1 \dots 1,2$  % и разделением области пластического течения на активную и релаксационные зоны. Дальнейшее пластическое течение на равномерной стадии приводит к возрастанию деформации как во всей активной зоне, так и в отдельных максимумах.

Вывод. Применение метода корреляции цифровых изображений позволяет детально описать пластическое течение металла на разных стадиях кривой растяжения. На примере стали 08Г2БМ обнаружено, что при одноосном растяжении неоднородность распределения деформации по длине образца возникает уже в начале пластического течения вблизи  $\sigma_{0,2}$  ( $\varepsilon_{yy} = 0,2 \dots 0,6$  %) в виде полос расположенных под углом  $\sim 30 \dots 45^\circ$  к оси нагружения.

На равномерной стадии пластического течения эта неоднородность усиливается – на профилях распределения  $\varepsilon_{yy}$  по длине образца возникают три максимума на расстояниях  $\Delta L_{обр} = 10 \dots 15$  мм, развитие которых продолжается вплоть до образования шейки. На сосредоточенной стадии деформации пластическое течение концентрируется в центральный максимум, а локальная скорость деформации по сравнению со скоростью деформации на равномерной стадии повышается на порядок ( $c \varepsilon = 0,1$  до  $1,2$  с<sup>-1</sup>).

## ЭКСТРУДИРУЕМЫЕ ГЕТЕРОМОДУЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА

Алексенко В.О.<sup>1,2</sup>, Панин С.В.<sup>1,2</sup>, Буслович Д.Г.<sup>1,2</sup>,  
Корниенко Л.А.<sup>1</sup>, Донцов Ю.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
Академический пр., 2/4, г. Томск, 634055, Россия, e-mail: svp@ispms.tsc.ru*  
<sup>2</sup>*Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,  
Пр. Ленина 30, г. Томск 634050 Россия, e-mail: svp@ispms.tsc.ru*

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен, обладая приемлемыми для полимеров характеристиками прочности, а также низким коэффициентом трения, высокой износо- и химической стойкостью в агрессивных средах, используется для изготовления узлов трения машин и механизмов, а также широко используется в медицине в качестве деталей и узлов ортопедических имплантатов. Однако в силу большой длины полимерных цепей он имеет крайне низкий показатель текучести расплава (ПТР – 0,06 г/10 мин), что не позволяет перерабатывать порошковый СВМПЭ традиционными для конструкционных пластиков методами, такими как литье под давлением, шнековая экструзия и др. При этом вопросы повышения технологичности (экструдированности) композитов на основе высокомолекулярной матрицы, в частности СВМПЭ, остаются не решенными. Для получения экструдированных, износостойких, твердосмазочных полимерных композитов для использования в аддитивных технологиях производства исследованы механические и триботехнические характеристики полимер-полимерных композиций СВМПЭ с целью дальнейшего их использования в качестве матриц.

Исследованы смеси СВМПЭ с привитыми и блок-сополимерами полиэтилена низкого давления (HDPE-g-VTMS, HDPE-g-SMA, HDPE-b-EVA), полипропиленом (ПП), блок-сополимерами полипропилена и полиамида с линейным полиэтиленом низкой плотности (PP-b-LLDPE, PA-b-LLDPE) и блок-сополимером сшитого полиэтилена (PEX-b).

Выбор полимерных компонент для сверхвысокомолекулярной матрицы с целью увеличения технологичности (экструдированности) СВМПЭ обусловлен поиском доступных (промышленно выпускаемых) и эффективных наполнителей для разработки износостойких экструдированных полимерных композитов для 3D-технологий производства с целью изготовления прочных и износостойких изделий сложной формы для трибоузлов в машиностроении и медицине. Подход, основанный на усилении модифицирующих эффектов за счет образования более прочных связей на границе раздела фаз «полимер–полимер», является эффективным и перспективным на пути расширения перечня доступных износостойких экструдированных полимерных материалов для успешного их использования в аддитивных технологиях.

Исследованы механические характеристики, экструдированность и износостойкость полимер-полимерных композиций на основе СВМПЭ при сухом трении скольжения в условиях различных скоростей и нагрузок. Показано, что величина износа полимерных смесей при большой скорости и умеренной нагрузке на образец (60 Н) возрастает по сравнению с чистым СВМПЭ, а при большой скорости и нагрузке на образец до 140 Н происходит кратное возрастание износа СВМПЭ и всех композиций на его основе (в 5–10 раз). Определены условия эксплуатации трибоузлов из композитов на основе СВМПЭ для машиностроения и медицины. Проанализированы наиболее эффективные наполнители для экструдированной матрицы СВМПЭ и показано, что композиты на их основе могут быть использованы в аддитивных технологиях получения изделий в узлах трения в машиностроении и медицине.

*Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154).*

## ТВЕРДОСМАЗОЧНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА (СВМПЭ)

Буслович Д.Г.<sup>1,2</sup>, Панин С.В.<sup>1,2</sup>, Корниенко Л.А.<sup>1</sup>,  
Алексенко В.О.<sup>1,2</sup>, Валентюкевич Н.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН.

Академический пр., 2/4, г. Томск, 634055, Россия, e-mail: [svp@ispms.tsc.ru](mailto:svp@ispms.tsc.ru)

<sup>2</sup>Национальный Исследовательский Томский политехнический университет.

Пр. Ленина 30, г. Томск 634050 Россия, e-mail: [dgb2@tpu.ru](mailto:dgb2@tpu.ru)

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), обладая приемлемыми характеристиками прочности, а также низким коэффициентом трения, высокой износо- и химической стойкостью в агрессивных средах, используется для изготовления узлов трения в машиностроении и медицине. Уникальные свойства СВМПЭ определяют и условия эксплуатации изделий из СВМПЭ (низкие температуры, агрессивные среды и т. д.). В последнее время активно разрабатываются экструдированные, высокопрочные и твердосмазочные нано- и микрокомпозиции на основе сверхвысокомолекулярной матрицы СВМПЭ. При этом мало исследованными остаются вопросы зависимости износостойкости указанных композиций в условиях сухого трения скольжения от скорости и величины нагрузки с целью определения ограничительных эксплуатационных интервалов.

В настоящей работе исследованы механические и триботехнические характеристики композиций на основе СВМПЭ с твердосмазочными наполнителями (политетрафторэтилен, стеарат кальция, дисульфид молибдена, коллоидный графит, нитрид бора) при сухом трении скольжения в условиях различных скоростей и нагрузок. На основе предыдущих исследований авторов выбрано оптимальное содержание твердосмазочных наполнителей в композиции в количестве 5 вес. %.

Износостойкость образцов в режиме сухого трения скольжения определяли по схеме «вал-колодка» при нагрузке на образец, закрепленный в держателе, 60 и 140 Н и скоростях скольжения 0,3 м/с и 0,5 м/с на машине трения СМТ-1 в соответствии с ASTM G99/DIN 50324. Размер образцов составлял 15,75×6,35×10 мм<sup>3</sup>. Диаметр контртела, выполненного из стали ШХ15, равнялся 35 мм.

Величину износа определяли путем измерения глубины дорожки трения с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ. Аттестация структуры нанокомпозиций проведена методами растровой электронной микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии и ИК-спектроскопии.

Показано, что износостойкость твердосмазочных композиций на основе СВМПЭ при умеренных скоростях скольжения (0,3 м/с) и нагрузках (60 Н) возрастает в 2–3 раза по сравнению с чистым СВМПЭ, в то время как при нагрузке 140 Н износостойкость как СВМПЭ, так и композиций на его основе снижается практически вдвое. При этом температура на поверхности трения увеличивается с 27 до 39 °С.

При большой скорости скольжения (0,5 м/с) и умеренной нагрузке (60 Н) износ образцов СВМПЭ и композиций вдвое выше, чем при скорости 0,3 м/с. Наконец, при высокой скорости скольжения и нагрузке (до 140 Н) наблюдается кратное возрастание износа СВМПЭ и всех композиций на его основе (в 5–10 раз). При этом температура поверхности трения поднимается до 64 °С. По данным поверхностей трения обсуждаются механизмы изнашивания твердосмазочных композиций на основе СВМПЭ при различных скоростях и нагрузках.

Определены условия эксплуатации трибоузлов из композиций на основе СВМПЭ для машиностроения и медицины. Проанализированы наиболее эффективные твердосмазочные наполнители для высокомолекулярной матрицы СВМПЭ в узлах трения машин и механизмов для различных областей практического использования.

*Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154).*

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ И ЕЕ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ИЗНОС ПРИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ЦАРАПАНИИ ПОКРЫТИЯ TiN

Еремина Г.М., Смолин А.Ю.

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Россия,  
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия,  
e-mail: [anikeeva@ispms.tsc.ru](mailto:anikeeva@ispms.tsc.ru)*

Тазобедренный сустав (ТБС) является важнейшим для опоры и передвижения человека. Патология ТБС влечет за собой ухудшение функционирования всего опорно-двигательного аппарата. Для лечения патологий ТБС в современном мире широко применяют эндопротезирование. Важным фактором, влияющим на долговечность протеза, является изнашивание в паре трения «головка протеза – вертлужная чаша». В качестве материалов, используемых в парах трения эндопротеза (ЭП) чаще всего применяют металлические сплавы на основе титана. Однако их применение в скользящих элементах конструкции ЭП ограничено по причине низкой износостойкости. Для решения данной проблемы перспективным является нанесение покрытия из нитрида титана (TiN), так как оно обладает хорошими трибологическими характеристиками и биосовместимостью. Механические и структурные характеристики покрытия во многом зависят от режима его нанесения. Механическое поведение таких покрытий в условиях трения и изнашивания изучено недостаточно, нет точных данных по влиянию на износ и трибологические характеристики таких факторов, как пористость покрытия, его толщина, шероховатость, сложная трехмерная структура. Кроме того, износ элементов протеза в паре трения оказывает существенное влияние на распределение напряжений в эндопротезе и окружающих его тканях в целом. Это обуславливает важность исследования механического поведения титанового ЭП с покрытием с учетом износа в паре трения.

Поведение материала эндопротеза в условиях изнашивания исследуется, прежде всего, экспериментально, наиболее распространенными являются такие методы как измерительное царапание, испытания на износ и т. д. Стоит отметить, что изнашивание является многофакторным процессом, а в теоретической модели как правило намного легче выделить отдельный фактор и исследовать его влияние на особенности процесса. Поэтому все большую популярность приобретают методы математического моделирования механического поведения ЭП.

В работе для исследования влияния толщины покрытия и ее шероховатости на механическое поведение при измерительном царапании применялся метод подвижных клеточных автоматов. Главным преимуществом метода для решения данной задачи является возможность явного учета несплошностей материала и моделирование разрушения. Модельный образец представлял собой параллелепипед, состоящий из титановой подложки и покрытия TiN, толщина которого варьировалась от 1,3 до 1,5 мкм, шероховатость – от 0,15 до 0,265 мкм.

По результатам моделирования были выявлены закономерности влияния толщины и шероховатости покрытия на процессы его изнашивания в условиях измерительного царапания.

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

## ПОВЫШЕНИЕ МЕЖФАЗНОЙ АДГЕЗИИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ ОБРАБОТКОЙ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНЕ

Хуан Цитао<sup>2</sup>, Панин С.В.<sup>1,2</sup>, Алексенко В.О.<sup>1,2</sup>,  
Корниенко Л.А.<sup>1</sup>, Иванова Л.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН.

Академический пр., 2/4, г. Томск, 634055, Россия, e-mail: [svp@ispms.tsc.ru](mailto:svp@ispms.tsc.ru)

<sup>2</sup>Национальный Исследовательский Томский политехнический университет.  
Пр. Ленина 30, г. Томск 634050 Россия, e-mail: [svp@ispms.tsc.ru](mailto:svp@ispms.tsc.ru)

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает повышенными значениями ряда физико-механических и функциональных свойств, в частности высоким сопротивлением изнашиванию, низким коэффициентом трения, химической стойкостью и др. СВМПЭ широко применяется в машиностроении и медицине. Однако ненаполненный СВМПЭ испытывает значительный износ при длительной эксплуатации и обладает низкими показателями предела текучести и предела прочности. Поиск путей повышения механических свойств и износостойкости композитов на основе СВМПЭ является актуальной научно-технической задачей.

Существуют различные подходы к формированию композитов на основе СВМПЭ с повышенными относительно ненаполненного полимера свойствами. Однако, ввиду химической инертности полиэтилена, при наполнении его различными добавками (прежде всего минеральными наполнителями) химических связей на межфазных границах не образуется, что проявляется в крайне низкой адгезии наполнителей к СВМПЭ, и как следствие, ведет к снижению механических характеристик, прежде всего модуля упругости и величины удлинения до разрушения.

Анализ результатов механических испытаний СВМПЭ, наполненного аэросилом (аморфный, пирогенный диоксид кремния с размером частиц от 5 до 40 нм) после органофилизации, выявил, что наряду с повышением модуля упругости наблюдается восьмикратное снижение трещиностойкости. Показано, что функционализация аэросила позволяет, как повысить механические свойства, так и увеличить сопротивление изнашиванию при сухом трении скольжения за счет повышения межфазной связи.

В этом контексте очевиден интерес к применению микроразмерных наполнителей, которые могут быть функционализированы с применением компатибилизаторов (промоутеров адгезии). В работе в качестве наполнителей СВМПЭ использовали микроволокна волластонита и микропорошок метагидроксида алюминия  $AlO(OH)$ . Для модифицирования поверхности наполнителей использовали реагент «Пента-1006» (ООО «ПЕНТА-91»), а именно, композит на основе поли[окси(диметилсилилена)]. Функционализацию наполнителей осуществляли их обработкой в водно-этанольных ( $pH = 4,5...5,5$ ) растворах модификатора «Пента-1006» при комнатной температуре при непрерывном перемешивании в течение 5 мин. Содержание реагента «Пента-1006» составляло 1 % от массы наполнителя. Затем суспензию высушивали в тепловом шкафу при температуре 120 °С. Образцы полимерных композитов были изготовлены методом горячего прессования при температуре 200 °С и давлении 10 МПа.

Исследованы структуры, механические характеристики и износостойкость композитов на основе СВМПЭ при сухом трении скольжения в условиях различных скоростей и нагрузок. При испытании в режиме сухого трения скольжения скорость вращения контртела составляла 0,3 м/с и 0,5 м/с; нагрузка на образец равнялась 60 и 140 Н.

Показано, что по сравнению с композиционным материалом, армированным исходным (необработанным) волластонитом, модуль Юнга после функционализации возрастает на 23 %. При умеренной нагрузке на образец (60 Н) величина износа снижается в 2 раза. В случае наполнения СВМПЭ функционализированным метагидроксидом алюминия механические свойства повышаются в среднем на 10 %, а износ уменьшается как при умеренной, так и при большой скорости скольжения (60 Н и 140 Н).

Таким образом, использование функционализированных порошковых и волокнистых наполнителей позволило повысить межфазную адгезию в композитах и, как следствие, увеличить механические и триботехнические характеристики. Обсуждаются механизмы повышения межфазной адгезии на основе теории взаимной диффузии.

*Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154).*

# ИССЛЕДОВАНИЕ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ НАНОСТРУКТУР ГИДРОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ

Казанцев С.О., Ложкомоев А.С.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИФПМ СО РАН), 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия, e-mail: [kzso@ispms.tsc.ru](mailto:kzso@ispms.tsc.ru)*

В настоящее время большой интерес представляет использование иерархически-организованных наноматериалов в качестве компонентов, улучшающих функциональные свойства различных изделий. Гидроксид алюминия является доступным, механически прочным, химически стабильным пористым материалом. Его использование в качестве модификатора позволяет улучшать механические, адсорбционные, биологические и другие свойства материалов. Исследование поверхностных свойств гидроксидов алюминия может позволить расширению его областей применения. Помимо этого текстура и свойства оксида и гидроксида алюминия зависят от условия синтеза. Исследование кислотно-основных характеристик наноструктур позволяет получить данные о структуре и природе активных центров на их поверхности и способствует разработке композиционных материалов с заданными свойствами.

Изменяя условия окисления электровзрывного нанопорошка алюминия можно получить наноструктуры, обладающие различной формой, размером, фазовым составом и имеющие различные поверхностные свойства. В работе рассмотрено влияние фазового состава синтезированных наноструктур гидроксидов алюминия на их кислотно-основные свойства. Для исследования кислотно-основных свойств полученных образцов был использован индикаторный метод. Адсорбция индикатора на поверхности оксидов позволяет определить качественный состав и концентрацию активных центров на поверхности оксида, а также вероятностное распределение активных центров по силе.

Подобранный набор индикаторов позволяет зарегистрировать изменение кислотно-основных свойств в диапазоне  $pK_a$  от 1,3 до 12,8. В результате были получены спектры поглощения для индикаторов. По полученным спектрам растворов индикаторов были рассчитаны показатели кислотно-основных центров для исследуемых материалов и построены графики зависимости кислотно-основных центров от значения  $pK$  индикатора.

Исследования показали, что распределение центров носит неоднородный характер и с достаточно четкой дифференциацией полос адсорбции с максимумами разной интенсивности, отвечающими определенному значению  $pK$ , с преимущественным преобладанием основных центров. Значительное количество основных центров разной силы зависит от типа и окружения  $OH^-$  групп на поверхности адсорбента. Слабые кислотные центры бренстедовского типа могут быть образованы молекулами воды, которые адсорбируются на катионах алюминия  $Al^{3+}$  или же на кислородных вакансиях на поверхности оксида алюминия.

Таким образом, условия окисления нанопорошка  $AlN/Al$  влияют как на формо-размерные характеристики образующихся гидроксидов алюминия, так и на кислотно-основные свойства их поверхности. При этом молекулы воды и  $OH^-$  группы в зависимости от окружения образуют на поверхности активные центры бренстедовского типа, которые в свою очередь обуславливают бифункциональность поверхности. В работе были продемонстрированы подходы к синтезу наноструктур на основе оксидов и гидроксидов алюминия с различными физико-химическими характеристиками, которые позволят расширить их область применения в различных отраслях промышленности.

*Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.604.21.0156, идентификатор проекта RFMEFI60417X0156).*

# СИНТЕЗ МИКРО-МЕЗОПОРИСТЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ БЕМИТА С РАЗЛИЧНЫМ ЗНАКОМ ЗАРЯДА ПОВЕРХНОСТИ

Ложкомоев А.С.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИФПМ СО РАН), 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия, e-mail: asl@ispms.tsc.ru*

В последнее время синтезу иерархически-организованным низкоразмерным наноструктурам на основе оксидов металлов уделяется большое внимание. Прежде всего, это связано с тем, что такие материалы способствуют значительному повышению функциональных характеристик изделий на их основе. Одним из факторов, влияющих на высокую активность низкоразмерных наноструктур, является распределение активных поверхностных групп на их поверхности, а также их количество, которые в итоге определяют знак заряда поверхности и его величину.

В нашей работе мы в гидротермальных условиях синтезировали агломераты складчатых наноллистов на основе бемита с положительным дзета-потенциалом поверхности +30,8 мВ и отрицательным дзета-потенциалом –39 мВ. В первом случае данный эффект достигался за счет гидротермального окисления нанопорошка алюминия в воде при температуре 100 °С в течение 6 ч. В результате были получены агломераты складчатых наноллистов бемита размером 0,5–2 мкм размер отдельных наноллистов достигал 400 нм при толщине 2–5 нм. Величина удельной поверхности наноструктур составила 293 м<sup>2</sup>/г. Во втором случае гидротермальное окисление нанопорошка алюминия проводили в присутствии стеклокерамических нановолокон марки В06F при 200 °С в течение 6 ч. В процессе реакции нановолокна растворялись и на поверхности образующихся наноллистов бемита осаждались функциональные группы кремния. В результате были синтезированы полы трубки диаметром 0,1–0,5 мкм, покрытые микро-мезопористой оболочкой размером около 200 нм. Оболочка сформирована складчатыми наноллистами бемита с функциональными группами на основе кремния. Величина удельной поверхности наноструктур составила 260 м<sup>2</sup>/г.

На примере анионного красителя эозина и катионного красителя метиленового голубого было показано, что в результате модификации поверхности наноллистов бемита функциональными группами кремния сорбционная емкость по эозину уменьшилась в 14 раз (с 14 мг/г до 1 мг/г), а по метиленовому голубому увеличилась в 130 раз (с 0,7 мг/г до 90 мг/г).

Полученные результаты могут быть использованы для создания адсорбентов с селективными сорбционными свойствами, а также для более эффективной модификации различных материалов, чувствительных к заряду поверхности модификатора.

*Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.604.21.0156, идентификатор проекта RFMEFI60417X0156).*

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АНТИФРИКЦИОННЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА (ПЭЭК)

Нгуен Дык Ань<sup>2</sup>, Панин С.В.<sup>1,2</sup>, Алексенко В.О.<sup>1,2</sup>,  
Корниенко Л.А.<sup>1</sup>, Иванова Л.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН.

Академический пр., 2/4, г. Томск, 634055, Россия, e-mail: svp@ispms.tsc.ru

<sup>2</sup>Национальный Исследовательский Томский политехнический университет.

Пр. Ленина 30, г. Томск 634050 Россия, e-mail: [nda.ttndyn@gmail.com](mailto:nda.ttndyn@gmail.com)

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) является инженерным конструкционным пластиком, который отличается высокой термической стойкостью, высокой прочностью, что обеспечивает возможность его широкого применения в автомобильной и авиационно-космической технике [1]. Однако ненаполненный ПЭЭК обладает недостаточной износостойкостью и высоким коэффициентом трения (0,3–0,4), что ограничивает его применение в узлах трения машин и механизмов.

В [2, 3] рассмотрены возможности улучшения износостойкости ПЭЭК добавлением в него различных наполнителей: керамических и углеродных частиц, стеклянных и углеродных волокон, твердых смазочных частиц и т. д. Кроме того, была подтверждена эффективность улучшения износостойкости и механических свойств композитов на основе ПЭЭК за счет использования наноразмерных наполнителей. Обладая высокой текучестью, композиты на основе ПЭЭК являются перспективными в аддитивных технологиях получения сложных изделий для машиностроения и медицины.

С целью применения наполнителя в роли твердой смазки исследованы механические и триботехнические характеристики композитов на основе ПЭЭК с углеродными нанотрубками (нановолокнами) в условиях сухого трения скольжения. Проведен сравнительный анализ эффективности углеродных нанотрубок и нановолокон в формировании триботехнических характеристик полимерных композитов на основе термопластичной матрицы.

В работе использовали порошок ПЭЭК фирмы Victrex, углеродные нановолокна (УНВ) «Таунит» ( $\psi = 60$  нм) и углеродные нанотрубки Tuball ( $\psi = 10$  нм). Композиты на основе ПЭЭК получали методом горячего прессования при давлении 14 МПа и температуре 400 °С со скоростью последующего охлаждения 5 °С/мин.

Износостойкость материалов в режиме сухого трения определяли по схеме «вал-колодка» при нагрузке 30Н и скорости скольжения вала 0,3 м/с в соответствии с ASTM G77 на машине трения СМТ-1. Аттестация структуры нанокompозитов проведена методами растровой электронной микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии и ИК-спектроскопии.

Доказано, что добавление небольшого количества УНВ и УНТ (не больше 1 мас. %) позволяет повысить износостойкость композитов на основе ПЭЭК вдвое. При этом нанокompозиты ПЭЭК + 0,5 мас. % УНТ и ПЭЭК + 1 мас. % УНВ показали лучшую износостойкость. Механическая активация смеси полимера с углеродными нанотрубками не приводит к повышению триботехнических характеристик нанокompозиций.

*Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154).*

## БИМОДАЛЬНЫЕ ПОРОШКИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Первиков А.В., Родкевич Н.Г., Глазкова Е.А., Лернер М.И.

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), Россия,  
e-mail: [pervikov@list.ru](mailto:pervikov@list.ru); [ngradk@ispms.tsc.ru](mailto:ngradk@ispms.tsc.ru); [eagl@ispms.tsc.ru](mailto:eagl@ispms.tsc.ru); [lerner@ispms.tsc.ru](mailto:lerner@ispms.tsc.ru)*

В настоящее время порошки металлов активно используются для разработки композиций для аддитивных технологий изготовления сложнопрофильных изделий с иерархически организованной структурой и контролируемыми физико-механическими свойствами. В связи с этим возникают жесткие требования к гранулометрическому составу порошков. В зависимости от конкретного применения химический состав и размер частиц металлических порошков может варьироваться в широких пределах и составлять от 10 до 100 мкм. Снижение пористости, шероховатости поверхности и улучшение физико-механических характеристик изделий достигается путем уменьшения размера частиц вплоть до использования нанопорошков. Однако оптимальным, в данном случае, является применение бимодальных порошков, включающих микро- и наночастицы. Применение таких композиций обеспечивает плотную упаковку частиц при формовании изделий за счет заполнения наночастицами пористого пространства между частицами микронного размера, позволяет улучшить текучесть и спекаемость порошков. Одной из главных проблем является смешивание порошков разной дисперсности для получения металлопорошковых композиций с равномерным распределением микро- и наночастиц. Цель настоящего исследования – получение бимодальных порошков на основе микро- и наночастиц из нержавеющей стали 316L и разработка металлопорошковых композиций на их основе для аддитивного изготовления изделий.

Для получения металлопорошковых композиций использовали смесь (I) микро- и наноразмерных стальных порошков и бимодальные порошки (II), синтезированные диспергированием проволоки из нержавеющей стали. Микropорошок нержавеющей стали с размером частиц от 1 до 4 мкм получали распылением расплава в инертной атмосфере. Нанопорошок и бимодальный порошок получали электрическим взрывом проволоки из стали 316L в инертной атмосфере (аргон). Нанопорошок представлен наночастицами размером 40–120 нм. Распределение по размерам бимодальных порошков имеет два максимума – около 70 нм и широкая полоса в области 0,5–4,0 мкм. Для получения металлопорошковых композиций образцы порошков I или II пассивировали стеариновой кислотой для предотвращения окисления частиц в процессе обработки и смешивали с пластификатором (парафином). Деагломерация и смешивание порошков в жидкой среде в присутствии стеариновой кислоты и парафина способствует равномерному распределению микро- и наночастиц в металлопорошковой композиции. Сложнопрофильные изделия из полученных композиций формовали с помощью термопластавтомата и спекали. Формованные изделия нагревали со скоростью 1 град/мин и выдерживали при 200 °С в течение 8 ч для удаления связующего и формирования прочного каркаса изделия за счет спекания наночастиц. Применение бимодальных порошков на основе микро- и наночастиц позволяет проводить предварительную термообработку изделий при более низких температурах по сравнению с микropорошками. Далее образцы спекали в вакуумной печи при температуре 1350 °С в течение 2 ч. Плотность изделий (I) составляла около 90 % от истинной плотности сплава, тогда как плотность изделий (II) приближалась к 98 %, при этом пористость и шероховатость изделий (II) была существенно ниже.

Применение бимодальных порошков из нержавеющей стали 316L, полученных электрическим взрывом проволоки, позволило упразднить важную стадию смешения микро- и нанопорошков, требующую специального оборудования и затрат энергии и разработать металлопорошковую композицию и изделия на их основе с улучшенными характеристиками.

*Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.604.21.0158, идентификатор проекта RFMEFI60417X0158).*

## ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БРИКЕТИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИЕМОМ МЕХАНОАКТИВАЦИИ

Николаева Л.А., Буренина О.Н.

*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
ул. Автоторожная, 20, Якутск, 677007, Россия,  
e-mail: [lanikolaeva\\_ipng@mail.ru](mailto:lanikolaeva_ipng@mail.ru)*

В настоящее время нет единого научно обоснованного подхода к выбору эффективного связующего и технологического регламента производства угольных брикетов на базе Кангаласского, Кировского и Кемпендяйского месторождений, поэтому разработка технологии производства брикетированного бурого угольного топлива весьма актуальна и имеет большую практическую перспективу для решения топливной проблемы в отдаленных районах Севера. Существующие в настоящее время технологии брикетирования как российского, так и зарубежного производства, не в полной мере удовлетворяют требованиям потребителей как по стоимости, так и по техническим требованиям для использования в зонах с холодным климатом. В качестве связующего вещества, повышающего качественные и теплотехнические характеристики топлива, выбран гудрон от переработки нефти, использование которого является экономически выгодным ввиду низкой себестоимости и доступности, требует значительно меньших транспортных издержек по сравнению с битумом. Для улучшения качества гудрона наиболее эффективно применение модификации его структурно-активными добавками, в качестве которых использовали природные сорбенты – сухой озерный сапропель оз. Большая Чабьда, бурые угли Кангаласского месторождения.

Результаты исследований по определению оптимальных составов и параметров брикетирования бурых углей показывают, что модифицирование гудрона высушенным и механически активированным озерным сапропелем позволяет получить связующую композицию для брикетирования бурых углей и создавать топливные брикеты с высокими техническими характеристиками. Оптимальное значение влажности угольной мелочи устанавливали брикетированием сушенки с различной влажностью при минимальном и максимальном давлениях прессования. Полученные результаты показывают, что прочность при сжатии образцов максимальна, при влажности угля 10–11 %. Значительную роль в процессе брикетирования играет подготовка угольной шихты требуемого ситового состава, при этом повышение прочности на сжатие особенно заметно в брикетных образцах, содержащих уголь с наименьшей крупностью (класс угля 0–1,25 мм) и смеси угля различной крупности: 0–1,25 (60 мас. %); 0–2,5 (30 мас. %); 2,5–5 (10 мас. %). Увеличение давления прессования до 150 МПа способствует получению более прочных брикетов, затем при достижении 200 МПа прочность образцов начинает падать. Прочностные характеристики брикетов практически удовлетворяют требованиям ГОСТ 7299–84, разработанного на брикеты из бурых углей по прочности на сжатие (7 МПа), максимальная прочность достигается при 150 МПа. Установлено, что прочность при сжатии брикетов увеличивается с ростом температуры конечной обработки и достигает максимального значения при 230 °С и выдержке при этой температуре в течение 180 мин. Рост прочности брикетов с повышением температуры вероятнее всего связан с увеличением скорости процесса окисления гудрона. В результате окислительной полимеризации и поликонденсации связующего происходят его отверждение, образование твердых высокомолекулярных соединений, обеспечивающих прочную связь между зернами брикетов. Исследование физико-механических характеристик показало, что для получения образцов, отвечающих требованиям нормируемыми ГОСТ, необходимо проводить процесс брикетирования в соответствии с установленным технологическим регламентом. Полученные результаты свидетельствуют о том, что оптимальны следующие параметры получения качественных топливных брикетов: крупность угля 0–2,5 мм; влага аналитическая угля – 10–11 %; давление прессования – 150,0 МПа; температура обработки – 230 °С; время термообработки – 180 мин.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Бехер С.А., Сыч Т.В.

*Сибирский государственный университет путей сообщения,  
191, ул. Д. Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация,  
e-mail: [beher@stu.ru](mailto:beher@stu.ru), [tatyana979@mail.ru](mailto:tatyana979@mail.ru)*

Характеристики преобразователей акустической эмиссии напрямую влияют на достоверность акустико-эмиссионного (АЭ) контроля. Согласно документам в области АЭ диагностики, установлено требование по проверке работоспособности акустико-эмиссионной аппаратуры перед каждым применением, в том числе проверке чувствительности преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ). При калибровке ПАЭ установлены требования к размеру и свойствам калибровочного блока, а также к схеме установки преобразователей.

Цель работы – совершенствование методов и средств калибровки ПАЭ и исследование характеристик непрерывных источников АЭ целей относительной калибровки ПАЭ. Для оценки амплитудных распределений и спектральных характеристик ПАЭ использованы статистические методы обработки данных. Также в работе рассмотрено моделирование акустико-эмиссионного тракта как единой акустической системы.

Экспериментальные исследования проводились на плоском объекте и объекте сложной геометрии. Предлагаемая методика основана на обработке широкополосного акустического сигнала, генерируемого трением специального устройства о поверхность объекта контроля. Были исследованы характеристики ПАЭ трех типов: ПП 0,1-0,7, ПП-001, GT-300. В качестве эталонного преобразователя был использован ПАЭ утвержденного типа GT-300. Построено амплитудное распределение сигналов непрерывной АЭ, регистрируемых эталонным преобразователем, получен закон распределения данных. Получены автокорреляционные функции сигналов для трех типов датчиков при регистрации АЭ сигналов на боковой раме тележки грузового вагона. Анализ зависимостей показал, что критическим значением параметра  $\Delta t$ , при котором параметры автокорреляционных функций на ПАЭ становятся близкими к функции случайного распределения импульсов смещения, образующей стационарный временной ряд со средним значением, стремящимся к нулю, является 30 мкс при пороге значимости, равным 0,2. Данные результаты позволили перейти к анализу АЧХ на каждом ПАЭ. На основе предложенного метода оценки относительной АЧХ преобразователей выполнены экспериментальные сравнительные испытания ПП-001 и ПП 0,1–0,7 с эталонным преобразователем GT-300 № 902. Для преобразователя ПП-001 АЧХ имеет максимум на частотах 120 кГц и 180 кГц, перепад АЧХ для этого преобразователя составил  $\pm 15$  дБ.

Таким образом, экспериментально получены амплитудно-частотные характеристики преобразователей в рабочих условиях. Исследовано изменение АЧХ акустического канала измерительной аппаратуры для плоских объектов и объектов сложной формы.

Для сравнения численных результатов и физического эксперимента в программной среде SolidWorks создана конечно-элементная модель калибровочного блока. Модель имела характерный размер 250 мм, толщину 8 мм, симметричное закрепление граней. В экспериментах для модели изменялась жесткость упругого основания. Получено распределение относительных деформаций модели для различных начальных условий. При точечном воздействии объект деформируется в локальной области и глобально, как единая конструкция. В физическом эксперименте в центре пластины проводилось ударное воздействие калиброванными элементами известной массы диаметром  $d$  6 мм и 8 мм, на пластину был установлен тензорезистор Kyowa KSP-6-350-E4 с базой 6 мм. Локальные деформации материала пластины регистрировались быстродействующей тензометрической системой Динамика-3. При снятии нагрузки локальная перестройка материала порождала импульсные АЭ сигналы, которые регистрировались системой цифровой многоканальной акустико-эмиссионной СЦАД 16.02/03.

Предложена и экспериментально исследована методика абсолютной калибровки преобразователей акустической эмиссии с использованием ударного воздействия калиброванными металлическими элементами известной массы, при этом регистрация локальных деформаций в месте удара проводится быстродействующей тензометрической системой.

Предложенная методика оценки характеристик преобразователей акустической эмиссии в реальных условиях эксплуатации позволяет производить определение АЧХ преобразователей при испытаниях объектов разной геометрической формы.

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Berto F., 30  
Byakov A.V., 29  
Eremin A.V., 29  
Khakhlenkova A.A., 18  
Maisuradze M.V., 13  
Maruschak P.O., 29, 30  
Moiseenko D.D., 30  
Moskvichev E.V., 18  
Panin S.V., 29, 30  
Ryzhkov M.A., 13  
Stankevich R., 29  
Stepanova L.V., 89, 107  
Syromyatnikova A.S., 29  
Vinogradov A., 30  
Vlasov I.V., 29, 30  
Акимова А.В., 21  
Алексенко В.О., 114, 115, 117, 120  
Аммосова О.А., 23  
Бабайлов Н.А., 47, 52, 73, 74  
Баронин Г.С., 81, 82  
Белозеров Г.А., 58  
Березин И.М., 11, 96  
Бехер С.А., 123  
Ботвин Г.В., 61  
Бузник В.М., 81, 82  
Буренина О.Н., 60, 122  
Бурмашева Н.В., 24, 104  
Буслович Д.Г., 114, 115  
Быкова Т.М., 25  
Валентюкевич Н.Н., 115  
Васильев С.В., 32, 62  
Васильева М.А., 27  
Веретенникова И.А., 28  
Вичужанин Д.И., 113  
Волков С.С., 9  
Гаврилов Н.В., 17  
Герасимов А.И., 61  
Глазкова Е.А., 121  
Гоголева О.В., 59, 67  
Голоднов А.И., 48  
Горкунов Э.С., 8, 51, 66,  
Горулева Л.С., 66  
Горшков А.В., 31, 90  
Грибов Д.С., 79  
Громов В.Е., 3  
Давыдова Н.А., 8  
Данзанова Е.В., 61  
Демаков С.Л., 40  
Дементьев В.Б., 92  
Дмитриев О.С., 81, 82  
Дмитриев С.Ф., 49  
Донцов Ю.В., 114  
Доронин С.В., 35, 36  
Дутов М.Н., 98  
Епин В.В., 93  
Еремина Г.М., 116  
Ефтифеева А.С., 37  
Завражин Д.О., 81, 82, 85  
Завражина К.В., 82  
Задворкин С.М., 51, 66  
Залазинская Е.А., 38  
Залазинский А.Г., 4, 38  
Замараев Л.М., 39  
Засыпкин А.Д., 92  
Зингерман К.М., 87  
Иванов Ю.Ф., 3  
Иванова Л.Р., 117, 120  
Игумнов А.С., 69  
Илларионов А.Г., 40  
Ишков А.В., 49  
Казаков А.Л., 43, 44  
Казанцев С.О., 118  
Канищев О.А., 75, 77  
Канюков С.И., 45  
Каплунов И.А., 46, 65, 87  
Катасонов А.О., 49  
Коган Л.Х., 8  
Колесников И.В., 109  
Колмогоров В.Л., 63  
Кондаков А.С., 20  
Кондратьев Н.С., 110  
Коновалов А.В., 3, 45, 58, 69, 104  
Коркин А.В., 57  
Корниенко Л.А., 114, 115, 117, 120  
Королев А.П., 98  
Котельникова Н.В., 100  
Кошелева Н.А., 102  
Крымский М.И., 65  
Крючков Д.И., 4  
Кузнецов А.В., 54  
Кузнецов П.А., 44  
Куренных Т.Е., 17  
Курмоярцева К.А., 100  
Лемперт А.А., 44  
Лернер М.И., 121  
Логинов Ю.Н., 5, 7, 47, 48, 52  
Ложкомоев А.С., 118, 119  
Лоскутова А.Д., 98  
Лукашук О.А., 6  
Лямец Л.Л., 75, 77

Майер А.Ф., 59  
Макаревич Е.С., 110  
Макаров А.В., 8, 17  
Макарчук М.В., 98  
Маликов В.Н., 49  
Малыгина И.Ю., 8  
Мамаев А.С., 17  
Миронов В.А., 21  
Миронов В.И., 6  
Миронова Т.Ф., 21  
Мичуров Н.С., 25  
Мищенко С.В., 81, 82, 85  
Морозов К.В., 3  
Муйземнек О.Ю., 45, 58  
Мясникова М.В., 69  
Нгуен Дык Ань, 120  
Нефедова О.А., 71  
Николаева Л.А., 122  
Няшина Н.Д., 110  
Овчинников Н.П., 53  
Огорелков Д.А., 6  
Огородников А.И., 88  
Осинцева А.Л., 8, 17  
Панин С.В., 114, 115, 117, 120  
Панченко Е.Ю., 37  
Партин А.С., 104  
Первиков А.В., 121  
Первухин А.Е., 47  
Перегудов О.А., 3  
Перминова А.В., 58  
Пестов А.В., 28  
Петрова П.Н., 59  
Петунин А.А., 96  
Петухова Е.С., 67  
Поволоцкая А.М., 7, 51  
Полухина О.Н., 113  
Поляков А.П., 11  
Поляков П.А., 11  
Полянский Л.И., 52  
Попов С.Н., 32, 62  
Портнягина В.В., 53  
Просвиряков Е.Ю., 24, 31, 41, 42, 90  
Пугачева Н.Б., 19, 25  
Пузанов М.П., 5, 7  
Рейзмунт Е.М., 35  
Рогалин В.Е., 46, 65, 87  
Рогожин М.В., 65  
Родионов А.К., 32, 62  
Родкевич Н.Г., 121  
Саввина А.В., 32, 62  
Саввинова М.Е., 60  
Саврай Р.А., 8, 17, 54  
Сагалаков А.М., 49  
Самойлова Г.В., 17  
Семенов А.А., 55  
Сенаева Е.И., 25  
Сероваев Г.С., 102  
Сидашов А.В., 109  
Смирнов А.С., 58, 69  
Смирнов С.В., 28, 39, 69, 113  
Смирнова Е.О., 28  
Смолин А.Ю., 116  
Собакина М.П., 53  
Соболева Н.Н., 8  
Соловей В.Д., 63  
Спевак Л.Ф., 41, 42, 43, 71  
Старостин Н.П., 23, 27, 72  
Степанов С.И., 40, 48  
Степанова Л.В., 108  
Стружанов В.В., 9, 57  
Сыч Т.В., 123  
Ташкинов М.А., 112  
Тимофеева Е.Е., 37  
Тихонов И.Н., 88  
Тихонов Р.С., 72  
Трусов П.В., 94, 100  
Туголуков Е.Н., 85  
Фарбер В.М., 113  
Федоров Ю.Ю., 32, 62  
Филин С.А., 46, 87  
Филиппова Ю.Ф., 35  
Халевицкий Ю.В., 69, 104  
Хотинов В.А., 113  
Хуан Цитао., 117  
Худорожкова Ю.В., 19  
Худяков В.В., 81, 82  
Цветков Р.В., 93  
Черемичина Э.Р., 25  
Чечулина Е.А., 79  
Чумляков Ю.И., 37  
Шалимов А.С., 112  
Шардаков И.Н., 93  
Шарифуллина Э.Р., 94  
Швейкин А.И., 94  
Шестаков А.П., 93  
Шипачева Е.Н., 96  
Шишин Н.Н., 73  
Шубина А.Н., 74  
Юрьев А.Б., 3  
Якименко И.В., 75, 77  
Янц А.Ю., 94, 105, 110

## СОДЕРЖАНИЕ

ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ В РЕЛЬСАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.Б., Перегудов О.А., Морозов К.В., Коновалов С.В.	3
ГИБРИДНЫЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПРЕССОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ Крючков Д.И., Залазинский А.Г.	4
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ АНИЗОТРОПНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Логинов Ю.Н., Пузанов М.П.	5
РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ПИКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК Миронов В.И., Огорелков Д.А., Лукашук О.А.	6
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Поволоцкая А.М., Логинов Ю.Н., Пузанов М.П.	7
ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ КОНТАКТНОМ НАГРУЖЕНИИ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПГ-СР2-Сr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ГАЗОПОРОШКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ Саврай Р.А., Макаров А.В., Горкунов Э.С., Соболева Н.Н., Коган Л.Х., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л., Давыдова Н.А.	8
УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ Волков С.С., Стружанов В.В.	9–10
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРУТКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫДАВЛИВАНИЕМ ПОРИСТОЙ ЗАГОТОВКИ Березин И.М., Поляков А.П., Поляков П.А.	11–12
THE DEPENDENCY OF MECHANICAL PROPERTIES ON MICROSTRUCTURE ANISOTROPY INDEX OF SOME ALLOYED STEELS Maisuradze M.V., Ryzhkov M. A.	13–16
ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ Макаров А.В., Самойлова Г.В., Гаврилов Н.В., Мамаев А.С., Осинцева А.Л., Куренных Т.Е., Саврай Р.А.	17
SURFACE ACCURACY ANALYSIS OF RIGID REFLECTOR IN MECHANICAL AND THERMAL LOADING Moskvichev E.V., Khakhlenkova A.A.	18
EBSD-АНАЛИЗ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СПЛАВА Cu-Zn-Mn-Al-Fe-Ni ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ Пугачева Н.Б., Худорожкова Ю.В.	19
ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ В ПОЛОСТИ ОТВОДА ВОДЫ ПОЖАРНОГО ГИДРАНТА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА Кондаков А.С.	20
МЕТОД РИТМОКАРДИОГРАФИИ В ДИАГНОСТИКЕ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЛИЦ С НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ Акимова А.В., Миронов В.А., Миронова Т.Ф.	21–22
РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМУФТОВОЙ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ Старостин Н.П., Аммосова О.А.	23

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ СЛОИСТОЙ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЗАДАНИИ ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУР И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ СИЛ НА СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕ Бурмашева Н.В., Просвиряков Е.Ю.	24
ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ SiC НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ С МАТРИЦЕЙ ИЗ СПЛАВА Д16 Пугачева Н.Б., Быкова Т.М., Мичуров Н.С., Сенаева Е.И., Черемичина Э.Р.	25–26
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВАРКИ СЕДЛОВЫХ ОТВОДОВ К ПОЛИЭТИЛЕНОВЫМ ТРУБАМ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ Старостин Н.П., Васильева М.А.	27
ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЯХ НА ОСНОВЕ СМОЛЫ ЭД-20 НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ Смирнов С.В., Веретенникова И.А., Смирнова Е.О., Пестов А.В.	28
INFLUENCE OF LONG-TERM OPERATION ON STRUCTURE AND FATIGUE DURABILITY OF 09Mn2Si PIPE STEEL Panin S.V., Marushchak P.O., Vlasov I.V., Eremin A.V., Byakov A.V., Syromyatnikova A.S., Stankevich R.	29
INFLUENCE OF STRESS CONCENTRATOR SHAPE AND TESTING TEMPERATURE ON IMPACT BENDING FRACTURE OF 17MN1SI PIPE STEEL Panin S.V., Vlasov I.V., Maruschak P.O., Moiseenko D.D., Berto F., Vinogradov A.	30
КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ТВЕРДОТЕЛЬНОМ ВРАЩЕНИИ Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.	31
УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ИСПЫТАНИЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОЙКОСТИ К БЫСТРОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ ТРЕЩИН В ПЭ ТРУБАХ Федоров Ю.Ю., Попов С.Н., Саввина А.В., Васильев С.В., Родионов А.К.	32–34
ПРОЕКТНЫЕ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ПРОЧНОСТИ КАРКАСА РЕФЛЕКТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., Филиппова Ю.Ф.	35
ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ СИЛОВОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕФЛЕКТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Доронин С.В.	36
ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ В МАРТЕНСИТНОМ СОСТОЯНИИ НА РАЗВИТИЕ В2-L1 <sub>0</sub> МАРТЕНСИТНЫХ ПЕРЕХОДОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СПЛАВОВ Co <sub>38</sub> Ni <sub>33</sub> Al <sub>29</sub> Ефтифеева А.С., Панченко Е.Ю., Тимофеева Е.Е., Чумляков Ю.И.	37
ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВДАВЛИВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО УДАРНИКА В ДЕФОРМИРУЕМОЕ ТЕЛО Залазинская Е.А., Залазинский А.Г.	38
КРАТКОВРЕМЕННАЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ Ti-5Al И GRADE 2 ПРИ НАГРЕВЕ В ВОЗДУХЕ И АРГОНЕ Замараев Л.М., Смирнов С.В.	39
АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА РАСТЯЖЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT16, ЗАКАЛЕННОГО С РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР Илларионов А.Г., Степанов С.И., Демаков С.Л.	40
ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СЛОИСТОЙ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЗАДАННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ НА ДНЕ Просвиряков Е.Ю., Спевак Л.Ф.	41

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ ПРИ УЧЕТЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА Просвиряков Е.Ю., Спевак Л.Ф.	42
РЕШЕНИЕ ВЫРОЖДАЮЩЕГОСЯ НЕЛИНЕЙНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С ЗАДАННОЙ ФУНКЦИЕЙ ИСТОЧНИКА МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Спевак Л.Ф., Казаков А.Л.	43
ОБ АНАЛИТИЧЕСКОЙ РАЗРЕШИМОСТИ ОДНОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ Kazakov A.L., Lempert A.A., Kuznetsov P.A.	44
КОНЦЕПЦИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕРСУБЪЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ КОВКИ Канюков С.И., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю.	45
ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ Филин С.А., Рогалин В.Е., Каплунов И.А.	46
ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ ИЗ ПЛАТИНОВОГО СПЛАВА Логинов Ю.Н., Первухин А.Е., Бабайлов Н.А.	47
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ЯЧЕИСТОГО ТИТАНОВОГО ИМПЛАНТАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МКЭ-МОДЕЛИРОВАНИЯ Логинов Ю.Н., Голоднов А.И., Степанов С.И.	48
ИССЛЕДОВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Катасонов А.О., Маликов В.Н., Сагалаков А.М.	49–50
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ПАКЕТОВ ПРОВОЛОК Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М.	51
СВОЙСТВА БРИКЕТОВ ИЗ КОКСОВОЙ МЕЛОЧИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ШТЕМПЕЛЬНОМ БРИКЕТИРОВАНИИ Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Полянский Л.И.	52
ЗАВИСИМОСТЬ СРЕДНЕЙ НАРАБОТКИ УЗЛА ГИДРОПЯТЫ ДО ОТКАЗА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ ДЛЯ СЕКЦИОННЫХ НАСОСОВ АК «АЛРОСА» Овчинников Н.П., Портягина В.В., Собакина М.П.	53
ОЦЕНКА КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВДАВЛИВАНИИ ЖЕСТКОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ШТАМПА С ПЛОСКОЙ ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ПЛАСТИНУ ИЗ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА Саврай Р.А., Кузнецов А.В.	54
УСТОЙЧИВОСТЬ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ Семенов А.А.	55–56
РАЗРУШЕНИЕ НАНОЦЕПОЧЕК ПРИ РАСТЯЖЕНИИ Стружанов В.В., Коркин А.В.	57
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛОМАТРИЧНОМ КОМПОЗИТЕ В95/10 % SiC В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР Белозеров Г.А., Смирнов А.С., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю., Перминова А.В.	58
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНОАКТИВАЦИИ И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА Петрова П.Н., Гоголева О.В., Майер А.Ф.	59

ИСТОЧНИКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) Буренина О. Н., Саввинова М.Е.	60
ИСПЫТАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ НА ДЛИТЕЛЬНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ Данзанова Е.В., Герасимов А.И., Ботвин Г.В.	61
УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ИСПЫТАНИЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОЙКОСТИ К БЫСТРОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ ТРЕЩИН В ПЭ ТРУБАХ Федоров Ю.Ю., Попов С.Н., Саввина А.В., Васильев С.В., Родионов А.К.	62
МЕТОД РАСЧЕТА КОНСТАНТ ПЛАСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ТЕОРИИ ХИЛЛА Соловей В.Д., <u>Колмогоров В.Л.</u>	63–64
О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ОПТИКИ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ВЫХОДНЫХ ОКОН Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И., Каплунов И.А.	65
ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С.	66
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ТРУБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ Петухова Е.С., Гоголева О.В.	67–68
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА В95/SiC ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ Смирнов С.В., Коновалов А.В., Мясникова М.В., Халевицкий Ю.В., Смирнов А.С., Игумнов А.С.	69–70
РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С НЕНУЛЕВЫМ КРАЕВЫМ РЕЖИМОМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Спевак Л.Ф., Нефедова О.А.	71
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ТРЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА Тихонов Р.С., Старостин Н.П.	72
ИНТЕРАКТИВНЫЙ КАЛЬКУЛЯТОР ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВАНИЯ Шишин Н.Н., Бабайлов Н.А.	73
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВОБОДНОЙ КОВКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ Шубина А.Н., Бабайлов Н.А.	74
МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Якименко И.В., Лямец Л.Л., Канищев О.А.	75–76
ОЦЕНКА ФУНКЦИИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ МАЛЫХ ВЫБОРОК Якименко И.В., Лямец Л.Л., Канищев О.А.	77–78
МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ: ОПИСАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ Грибов Д.С., Чечулина Е.А.	79–80
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФТОРПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ КОБАЛЬТА Баронин Г.С., Бузник В.М., Дмитриев О.С., Мищенко С.В., Завражин Д.О., Худяков В.В.	81–82

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ФТОРОПЛАСТА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ ТИТАНА Баронин Г.С., Бузник В.М., Дмитриев О.С., Завражина К.В., Мищенко С.В., Завражин Д.О., Худяков В.В.	83–84
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОВОЛН УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ И ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИТАМИ Мищенко С.В., Завражин Д.О., Туголуков Е.Н.	85–86
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СИЛОВОЙ МЕТАЛЛООПТИКИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕЕ РЕСУРСА С.А. Филин, В.Е. Рогалин, И.А. Каплунов, К.М. Зингерман	87
КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ Огородников А.И., Тихонов И.Н.	88
MODELING OF THE CRACK GROWTH UNDER MIXED MODE LOADING UNDER MIXED MODE LOADING BY MOLECULAR DYNAMICS METHOD AND LINEAR FRACTURE MECHANICS APPROACH Stepanova L.V.	89
КРУПНОМАСШТАБНАЯ СЛОЖНАЯ КОНВЕКЦИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛООБМЕНА ПО ЗАКОНУ НЬЮТОНА Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю.	90
К ВОПРОСУ ЗАРОЖДЕНИЯ ОЧАГА РАЗРУШЕНИЯ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д.	91–92
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В УПРУГОЙ ТРУБКЕ Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.	93
МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ: К ОПИСАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ФОРМОВАНИЯ Трусов П.В., Швейкин А.И., Янц А.Ю., Шарифуллина Э.Р.	94–95
ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ Шипачева Е.Н., Петунин А.А., Березин И.М.	96–97
ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МУАРА Королев А.П., Макаrchук М.В., Дутов М.Н., Лоскутова А.Д.	98–99
МНОГОУРОВНЕВОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ Курмоярцева К.А., Котельникова Н.В., Трусов П.В.	100–101
АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПКМ-ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО Сероваев Г.С., Кошелева Н.А.	102–103
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СЛАУ ПРИ РЕШЕНИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ НА ГЕТЕРОГЕННОЙ КЛАСТЕРНОЙ СИСТЕМЕ Халевицкий Ю.В., Коновалов А.В., Бурмашева Н.В., Партин А.С.	104
ОПИСАНИЕ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ В СЛУЧАЕ БОЛЬШИХ ГРАДИЕНТОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ: О ФИЗИЧЕСКОМ СМЫСЛЕ СКАЛЯРНОЙ МЕРЫ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ Янц А.Ю.	105–106
ESTIMATION OF THE CRACK PROPAGATION DIRECTION ANGLE FOR TWO COLLINEAR CRACKS OF DIFFERENT LENGTHS IN INFINITE PLANE Stepanova L.V.	107
ОБОБЩЕННЫЕ КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ Степанова Л.В.	108

МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛОПОЛИМЕРНОЙ ТРИБОСИСТЕМЫ Колесников И.В., Сидашов А.В.	109
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ Кондратьев Н.С., Макаревич Е.С., Няшина Н.Д., Янц А.Ю.	110–111
МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИНЫ В МАТРИЦЕ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ СО СЛУЧАЙНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА XFEM Шалимов А.С., Ташкинов М.А.	112
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ СТАЛИ 08Г2БМ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ Смирнов С.В., Хотинев В.А., Вичужанин Д.И., Полухина О.Н., Фарбер В.М.	113
ЭКСТРУДИРУЕМЫЕ ГЕТЕРОМОДУЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА Алексенко В.О., Панин С.В., Буслович Д.Г., Корниенко Л.А., Донцов Ю.В.	114
ТВЕРДОСМАЗОЧНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА (СВМПЭ) Буслович Д.Г., Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Валентюкевич Н.Н.	115
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ И ЕЕ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ИЗНОС ПРИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ЦАРАПАНИИ ПОКРЫТИЯ TiN Еремина Г.М., Смолин А.Ю.	116
ПОВЫШЕНИЕ МЕЖФАЗНОЙ АДГЕЗИИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ ОБРАБОТКОЙ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНЕ Хуан Цитао, Панин С.В., Алексенко В.О., Корниенко Л.А., Иванова Л.Р.	117
ИССЛЕДОВАНИЕ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ НАНОСТРУКТУР ГИДРОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ Казанцев С.О., Ложкомоев А.С.	118
СИНТЕЗ МИКРО-МЕЗОПОРИСТЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ БЕМИТА С РАЗЛИЧНЫМ ЗНАКОМ ЗАРЯДА ПОВЕРХНОСТИ Ложкомоев А.С.	119
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АНТИФРИКЦИОННЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА (ПЭЭК) Нгуен Дык Ань, Панин С.В., Алексенко В.О., Корниенко Л.А., Иванова Л.Р.	120
БИМОДАЛЬНЫЕ ПОРОШКИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ Первиков А.В., Родкевич Н.Г., Глазкова Е.А., Лернер М.И.	121
ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БРИКЕТИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИЕМОВ МЕХАНОАКТИВАЦИИ Николаева Л.А., Буренина О.Н.	122
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Бехер С.А., Сыч Т.В.	123–124
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	125

*Научное издание*

XI Международная конференция  
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»  
сборник материалов (Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г.)

Рекомендовано к изданию  
Ученым советом ИМАШ УрО РАН

Ответственный за выпуск *Худорожкова Ю.В.*  
Компьютерная верстка *Гариева А.В.*

ISBN 978-5-7691-2492-1



Подписано в печать 08.12.2017.  
10,50 п.л.

Оригинал-макет изготовлен в  
Научно-редакционном отделе ИМАШ УрО РАН.  
620049 г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

