

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
РФФИ
УрО РАН
ИМАШ УрО РАН
ИФПМ СО РАН
ИФМ УрО РАН

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ



МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Екатеринбург
09-13 ноября 2020 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российский фонд фундаментальных исследований
Уральское отделение Российской академии наук
ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН
ФГБУН Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН
ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

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

Сборник материалов

(Екатеринбург, 09–13 ноября 2020 г.)

Екатеринбург
ИМАШ УрО РАН
2020

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*;

Швейкин В.П. *Екатеринбург, Россия*; Иршик Х., *Линц, Австрия*

Зам. председателя оргкомитета:

Смирнов С.В., *Екатеринбург, Россия*

Члены оргкомитета:

Батаев А.А., *Новосибирск, Россия*

Матвеев В.П., *Пермь, Россия*

Беляев А.К., *Санкт-Петербург, Россия*

Мену А., *Касабланка, Марокко*

Богданович А.В., *Минск, Беларусь*

Миронов В.А., *Екатеринбург, Россия*

Брезинова Ж., *Кошице, Словакия*

Миховски М., *София, Болгария*

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

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

Вухерер Т., *Марибор, Словения*

Мулюков Р.Р., *Уфа, Россия*

Головин С.В., *Новосибирск, Россия*

Панин С.В., *Томск, Россия*

Горячева И.Г., *Москва, Россия*

Прентковскис О., *Вильнюс, Литва*

Гутманас Э., *Хайфа, Израиль*

Сундер Р., *Бангалор, Индия*

Дегтярь В.Г., *Миасс, Россия*

Фомин В.М., *Новосибирск, Россия*

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

Ченцов А.Г., *Екатеринбург, Россия*

Ломакин Е.В., *Москва, Россия*

Шиплюк А.Н., *Новосибирск, Россия*

Марущак П.О., *Тернополь, Украина*

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

Программный комитет:

Председатель: Швейкин В.П., *Екатеринбург, Россия*

Зам. председателя программного комитета:

Кузнецов А.В., *Екатеринбург, Россия*

Члены программного комитета:

Буров С.В. *Екатеринбург*

Берестова С.А., *Екатеринбург*

Плехов О.А., *Пермь*

Гладковский С.В., *Екатеринбург*

Поволоцкая А.М., *Екатеринбург*

Дементьев В.Б., *Ижевск*

Просвиряков Е.Ю., *Екатеринбург*

Коновалов А.В., *Екатеринбург*

Пугачева Н.Б., *Екатеринбург*

Костин В.Н., *Екатеринбург*

Радченко В.П., *Самара*

Макаров А.В., *Екатеринбург*

Соболева Н.Н., *Екатеринбург*

Матвиенко Ю.Г., *Москва*

Трусов П.В., *Пермь*

Москвичев В.В., *Красноярск*

Худорожкова Ю.В., *Екатеринбург*

Наймарк О.Б., *Пермь*

XIV Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»
Екатеринбург, 09–13 ноября 2020 г. : сб. материалов. – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2020. –
429 с. – ISBN 978-5-6040873-2-9.

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:

МИНОБРНАУКИ России, УрО РАН, ИМАШ УрО РАН, ИФПМ СО РАН, ИФМ УрО РАН при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-20007 г).

ISBN 978-5-6040873-2-9



9 785604 087329

© ИМАШ УрО РАН, 2020

ОБОСНОВАНИЕ СВОЙСТВ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА САМООРГАНИЗАЦИИ

Берман А. Ф.

*Институт динамики систем и теории управления СО РАН,
134, ул. Лермонтова, г. Иркутск, 6640336, Российская Федерация,
e-mail: bafbam@mail.ru*

Цель работы – совершенствование технологии предпроектных исследований направленных на повышение надежности, живучести и безопасности (НЖиБ) сложных механических систем (СМС), их компонентов и элементов по критериям прочности и ресурса, на основе эвристической модели пространства технического состояния СМС и принципов искусственной самоорганизации [1].

Ресурс СМС в основном ограничен продолжительностью деградиционных процессов, протекающих в материале деталей. Деградиционные процессы обусловлены сочетанием воздействующих факторов и свойств материала. А так как подобные сочетания неисчислимы, а закономерности деградиционных процессов неизвестны с достаточной точностью, то проблема оценки прочности и ресурса вновь создаваемых СМС является междисциплинарной.

Разработан принцип самоорганизации свойств НЖиБ СМС, представленный совокупностью эвристической иерархической трансдисциплинарной модели (ТДМ) [2], метаэвристических и эвристических правил, формирующих алгоритм формирования свойств. Принцип самоорганизации обеспечивает взаимосвязь и обработку междисциплинарной информации и представляет собой метод автоматизированного обоснования свойств.

ТДМ представлена в виде структурного (СМС, компоненты, элементы), временного и информационного иерархических уровней. Временной уровень отражает динамику технического состояния, представленную исправным, неработоспособным и опасным состояниями. Информационный уровень, отражает научно-отраслевой аспект описания состояний и представлен функциональным, техническим, физическим и другими уровнями. Рассмотрение динамики технического состояния позволяет практически исключить катастрофические отказы. Информационные уровни обеспечивают представление и связь описания состояний знаниями различных предметных областей, что повышает качество решения задач, в том числе благодаря взаимопониманию экспертов и специалистов различных отраслей знаний. Разработан принцип формулировки метаэвристик, формирующих состав экспертных систем (ЭС) и вычислительных модулей (ВМ) для решения междисциплинарных задач обеспечения свойств НЖиБ.

Сформулированные принципы обеспечивают автоматическую конфигурацию интеллектуальной информационной системы обоснования свойств в соответствии с выбранным объектом, целью и решаемыми задачами. Алгоритм Самоорганизации свойств и соответствующие ему процедуры решения задач, необходимые ЭС и ВМ, формируются метаэвристиками и эвристиками. Самоорганизация повышает качество и эффективность процесса обоснования свойств создаваемых СМС, сборочных единиц и деталей, а также существенно сокращает время на разработку и модификацию интеллектуальных информационных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: проект РФФИ № 18-08-00560. https://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_2070525

Литература

1. Корниенко С. В., Корниенко О. А. Искусственная самоорганизация и коллективный искусственный интеллект: на пути от индивидуума к социуму // От моделей поведения к искусственному интеллекту / под ред. В. Г. Редько. – 2-е изд. – URSS, 2010. – 456 с.
2. Трансдисциплинарность в философии и науке: подходы, проблемы, перспективы / под ред. В. Бажанова, Р. В. Шольца. – М. : Издательский дом «Навигатор», 2015. – 564 с.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИИ СТРУКТУРЫ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНО-ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Хачай О. А.¹, Хачай А. Ю.², Хачай О. Ю.³

¹Институт геофизики УрО РАН, 100, ул. Амундсена, г. Екатеринбург, 620016, Россия, olgakhachay@yandex.ru

²Уральский Федеральный Университет ИЕН&М, 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Россия
e-mail: andrey.khachay@gmail.com

³Уральский Федеральный Университет ИЕН&М, 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Россия
e-mail: khachay@yandex.ru

В огромном и все еще плохо освоенном разрыве между макроуровнем и атомным уровнем, подчиненным законам квантовой механики, существует обширный мезоиерархический уровень структуры материи. На макроуровне хорошо развиты континуальные теории непрерывных сред и инженерные методы расчета и построения. Мезоиерархический уровень структуры материи известен как уровень с беспрецедентными ранее продуктами и технологиями, которые могут быть созданы искусственно. Нанотехнология – это качественно новая стратегия в индустрии: она создает объекты с точностью до наоборот – крупные объекты создаются из маленьких [1]. Мы разработали новый метод анализа акустического мониторинга упругой среды со слоистыми блоками с несколькими иерархическими включениями различных физических и механических иерархических структур и различных размеров [2]. Разработан итерационный процесс для решения прямой и обратной задачи для случая трех иерархических включений l , m , s -го рангов на основе использования двумерных интегро-дифференциальных уравнений. Степень иерархии включений определяется значениями их рангов, которые могут быть разными, в то время как первый ранг связан с атомной структурой, следующие ранги связаны с увеличением геометрических размеров, которые содержат включения более низких рангов и размеров. Иерархические включения расположены в разных слоях один над другим: верхний аномально пластичный, второй аномально упругий, а третий аномально плотный. Степень заполнения включениями каждого ранга для всех трех иерархических включений различна. Процесс моделирования и обратного решения осуществляется от меньших размеров до крупных включений; в результате становится возможным определить необходимые параметры формованного материала по данным акустического мониторинга.

Литература

1. Нанотехнологии в ближайшее десятилетие. Прогноз направления исследований. – Москва : Мир, 2002. – 292 с.
2. Хачай О. А., Хачай А. Ю., Хачай О. Ю. – AIP Conference Proceedings. – 2018. – 2053. – 030023. – DOI: 10.1063/1.5084384.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ

Маликов А. Г., Оришич А. М.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук
4/1, ул. Институтская, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: smalik@ngs.ru*

Алюминиево-литиевые сплавы обладают малой плотностью, повышенным модулем упругости и высокой прочностью по сравнению с обычными алюминиевыми сплавами и являются перспективными материалами для авиакосмической промышленности. В последнее время возникает повышенный интерес к среднепрочным алюминиево-литиевым сплавам системы Al-Mg-Li, которые являются коррозионностойкими, трещиностойкими, имеют чрезвычайно низкую плотность и обладают способностью надежно свариваться с высокопрочными сплавами системы Al-Cu-Li. Проводятся многочисленные исследования по оптимизации режимов термической обработки, включающие закалку и искусственное старение, для повышения механических характеристик. С целью замены технологии заклепочного соединения, широко применяемой в авиационно-космической технике, и снижения тем самым веса получаемых конструкций активно разрабатываются технологии сварки алюминиево-литиевых сплавов различными способами: сварка трением с перемешиванием, лазерная сварка, гибридная лазерная сварка. Лазерная сварка обладает рядом преимуществ перед другими способами сварки. При данном способе сварной шов имеет малую ширину, а значит, малую зону термического воздействия, наблюдается большая глубина проникновения луча в материал за счет большой плотности энергии. Высокая скорость процесса сварки, а также возможность автоматизации процесса делают этот метод наиболее перспективным. Однако ограниченное число работ по исследованию сварных соединений сплавов показывает, что прочность сварных соединений получается низкая и составляет 0,67–0,8 от прочности основного сплава. В работе проведено исследование лазерной сварки современных алюминиево-литиевых сплавов системы Al-Mg-Li и Al-Cu-Li. Проведена оптимизация постобработки сварных соединений с помощью процесса закалки и искусственного старения. Необходимо отметить дополнительную сложность оптимизации процесса постобработки, обусловленную тем, что процессу термической обработки подвергается не только шов, но и весь образец, т. е. и основной сплав.

Исследовано изменение структурно-фазового состава сварных соединений сплава до и после термообработки при оптимальных условиях с использованием электронной сканирующей микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и дифрактометрии синхротронного излучения. Для всех этапов термообработки определено влияние химического состава сплава, т.е. основных легирующих элементов Mg и Cu и фазового состава интерметаллидных упрочняющих фаз, на прочность и микроструктуру

Использование оптимальной термической обработки позволило получить замкнутый цикл фазовых превращений для сплава, и создать условия формирования упрочняющих фаз в сварном шве для получения высокой прочности сварного соединения. Впервые для сплава системы Al-Mg-Li и Al-Cu-Li достигнута прочность сварного шва на разрыв, равная или выше 500 МПа после проведения термообработки в виде закалки и искусственного старения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект № 17-79-20139.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИФЕНИЛГУАНИДИНА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Дьяконов А. А.¹, Данилова С. Н.¹, Васильев А. П.¹, Охлопкова А. А.¹,
Слепцова С. А.¹, Кычкин А. К.²

¹Северо-Восточный федеральный университет,
46, ул. Кулаковского, г. Якутск, 677013, Российская Федерация,
e-mail: afonya71185@mail.ru

²Институт физико-технических проблем Севера СО РАН,
1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, Российская Федерация

В работе приведены результаты исследования влияния дифенилгуанидина (ДФГ) на физико-механические свойства и структуру сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Установлено, что модификация СВМПЭ данными наполнителями приводит к существенному повышению деформационно-прочностных характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ). Проведены структурные исследования методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Показано, что модификация СВМПЭ приводит к трансформации надмолекулярной структуры, зафиксировано снижение степени кристалличности. Результаты исследования термодинамических параметров ПКМ методом дифференциально-сканирующей калориметрии показали, что происходит снижение степени кристалличности. Методом ИК-спектроскопии выявлено, что использование ДФГ при модификации полиэтилена способствует образованию новых кислородсодержащих функциональных групп, интенсифицирующих взаимодействие наполнителя с его макромолекулами.

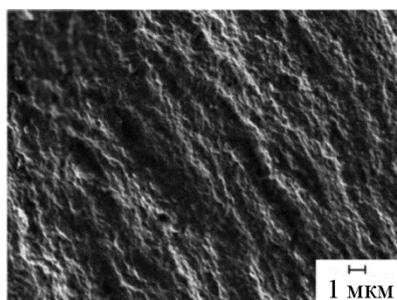
В таблице приведены результаты исследования предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве, предела текучести, модуля упругости при растяжении СВМПЭ и ПКМ.

Физико-механические свойства СВМПЭ и ПКМ

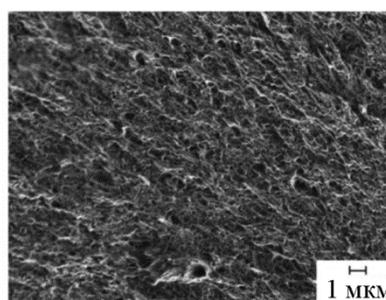
Образец	$\sigma_{рм}$, МПа*	$\epsilon_{рр}$, %	$\sigma_{т}$, МПа	$E_{р}$, МПа
СВМПЭ	33 ± 3	339 ± 18	$22,0 \pm 1,0$	505 ± 25
СВМПЭ/ДФГ	47 ± 3	396 ± 21	$22,2 \pm 1,0$	584 ± 39

* $\sigma_{рм}$ – предел прочности при растяжении; $\epsilon_{рр}$ – относительное удлинение при разрыве; $\sigma_{т}$ – предел текучести; $E_{р}$ – модуль упругости.

На рисунке приведены микрофотографии надмолекулярной структуры исходного СВМПЭ и ПКМ.



а



б

Микрофотографии надмолекулярной структуры при $\times 3000$:
а – исходный СВМПЭ; б – СВМПЭ/ДФГ

Как видно из рисунка а, надмолекулярная структура исходного СВМПЭ является ламеллярной и состоит из плотных пачечных образований. Надмолекулярная структура СВМПЭ, наполненного ДФГ, характеризуется как ламеллярная (рисунок б).

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МАТЕРИАЛА СОЕДИНЕНИЯ 12X18H10T/Cu/VT1-0

Пугачева Н. Б.¹, Сенаева Е. И.^{1,2}, Макаров А. В.^{1,2,3}

¹Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

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

³Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620990, Российская Федерация,
e-mail: nat@imach.uran.ru

В последнее десятилетие особый интерес для разработчиков высокоскоростных транспортных средств представляет применение лазерной сварки для получения соединений элементов конструкций из разнородных материалов, таких как сталь 12X18H10T и титановый сплав VT1-0 с целью уменьшения веса конструкций при сохранении их прочности на уровне одного из соединяемых материалов. В настоящее время накоплен большой опыт применения промежуточных вставок, например меди, для сварки этих материалов, однако сведений о влиянии режимов сварки на химический состав материала сварного шва (СШ) крайне мало. Цель работы заключалась в определении влияния режима лазерной сварки на химический состав СШ стали 12X18H10T и титанового сплава VT1-0 с промежуточной медной вставкой.

Исследования проводили на образцах, полученных с помощью CO₂-лазера в ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН под руководством проф. д.ф.-м.н. А.М. Оришича. Режимы сварки отличались мощностью излучения (P) от 1 до 2,4 кВт, скоростью сварки (V) от 0,3 до 1 м/мин и положением фокуса относительно верхней поверхности образцов. Методом микрорентгеноспектрального анализа с помощью сканирующего микроскопа TESCAN с приставкой OXFORD определяли химический состав материала полученных СШ в верхней, центральной и нижней частях по результатам сканирования участков площадью 0,5 мм² на поверхности поперечных шлифов образцов со СШ.

Установлено, что при P = 1,0 кВт и V = 0,3 м/мин формируются однородные по химическому составу СШ, средняя концентрация Ti составила 15 мас. %, однако кристаллизация произошла по дендритному механизму с преобладанием интерметаллидов (Fe,Cr)₂Ti и малой долей твердого раствора на основе меди. Увеличение V до 0,4 м/мин при сохранении мощности излучения привело к формированию неоднородного по химическому составу СШ слоистого строения с хорошо различимыми зонами, обогащенными медью или железом. Содержание Ti в этом СШ составило 3,8 мас. %. При V до 0,6 м/мин и P = 1,7 кВт сформировался СШ с отдельными сферическими областями, обогащенными титаном и железом. Среднее содержание Ti составило 15 мас. %. Повышение V до 1 м/мин при P = 2,4 кВт привело к формированию однородного по химическому составу СШ, на строение которого оказало влияние месторасположение фокуса. При подъеме фокуса на 1 мм над поверхностью образцов медная пластина расплавилась лишь на 2/3 высоты СШ. При расположении фокуса на поверхности образца растворилось максимальное количество Ti – 32 мас. %. При заглаблении фокуса в образец на 2 мм сформировался однородный по химическому составу СШ со средним содержанием Ti 24 мас. %, а при заглаблении на 4 мм наряду с высокой однородностью по химическому составу удалось получить минимальное содержание титана 1,5 мас. % в СШ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-48-660065_p_a.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

Жачкин С. Ю.^{1,2}, Трифонов Г. И.¹, Бирюков А. В.²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
54 А, Старых Большевиков, г. Воронеж, 394064, Российская Федерация,
e-mail: trifonov_gi@mail.ru

²Воронежский государственный технический университет,
14, Московский проспект, г. Воронеж, 394026, Российская Федерация,
e-mail: grishakip@yandex.ru

Одним из перспективных способов восстановления изношенных деталей является плазменное напыление [1]. При планировании применения данной технологии можно выделить технические проблемы, характеризующие конкретную деталь и ее функциональный слой.

Цель работы – анализ факторов плазменного напыления, влияющих на разработку системы автоматизированного проектирования (САПР). Разработка структурной схемы САПР нанесения покрытий для дальнейшего контроля и прогнозирования параметров технологии.

Анализируя особенности процесса плазменного напыления, выделены основные факторы, которые напрямую влияют на разработку САПР нанесения функциональных покрытий и делают процесс планирования создания САПР весьма затруднительным.

Учитывая факторы и особенности, влияющие на разработку системы автоматизированного проектирования, разработка САПР должна быть направлена на создание комплекса модулей автоматизированных процессов. Данный вывод обусловлен тем, что на современном этапе развития производственных линий необходимо уходить от вредных условий работы, а также повышать качество получаемых покрытий за счет автоматизации процессов обработки детали [2].

В связи с этим выделяют следующие этапы автоматизированного проектирования технологии производства деталей машин с функциональными покрытиями [3]:

- 1) анализ технического задания (ТЗ);
- 2) поиск аналогов и прототипов, а также готовых решений;
- 3) выбор материалов покрытия в зависимости от заявленной стоимости работ и функциональности заявленного покрытия.

На этапе функционального проектирования производились следующие работы: подбор материала покрытия, подбор режимов напыления, техническая и технологическая подготовка производства, а также подбор специального оборудования. При невозможности осуществить необходимый технологический процесс на существующем оборудовании производится проектирование и разработка новых установок или технологических решений [4].

Опираясь на проведенный анализ особенностей технологии плазменного напыления и факторов, влияющих на ее обеспечение, была разработана структурная схема САПР плазменного напыления.

С учетом разработанной структурой схемы САПР составлены три этапа по формированию САПР для плазменного напыления.

Литература

1. Лещинский Л. К. Плазменное поверхностное упрочнение. – К. : Техника, 1990. – 109 с.
2. Балановский А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2006. – 180 с.
3. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008, 360 с.
4. Ильющенко А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларус. навука, 2011, 357 с.

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

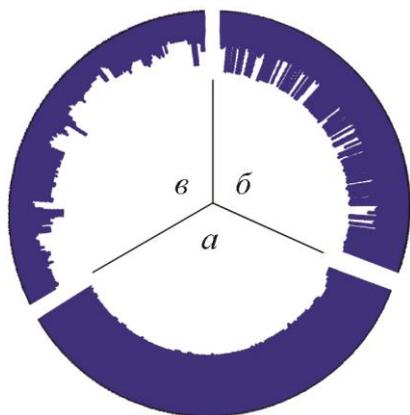
Жуков Д. В.^{1,2}, Коновалов С. В.²

¹ООО «Газпром трансгаз Самара», 106А, ул. Ново-Садовая, г. Самара, 443068, Российская Федерация,
e-mail: dzetii@mail.ru

²Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева,
34, ул. Московское Шоссе, г. Самара, 443086, Российская Федерация

Периодическая диагностика технического состояния промышленных объектов, в частности магистральных газопроводов, является одним из ключевых элементов их продолжительной безопасной эксплуатации. Одним из значительных факторов разрушения и потери несущей способности объектов наряду с коррозией является развитие дефектов производства и монтажа. По отчету Европейской группы по сбору данных об инцидентах на газопроводах (EGIG), основными причинами аварий являются внешние воздействия – 28,37 %; коррозия – 25 % и дефекты материала и конструкций – 17,79 % [1].

Одними из самых распространенных внутренних производственно-технологических дефектов, проявляющихся в эксплуатации, являются неметаллические включения и несплошности. Основными дефектами такого рода являются ликвация и расслоение. Ликваци-



Толщинограммы секторов труб: *a* – без дефектов;
б – с ликвацией;
в – с расслоениями

онные включения неизбежны при массовом производстве и допустимы в готовых изделиях при определенных стандартах параметров. Расслоения, различной природы образования являются недопустимыми дефектами. Контроль внутренних дефектов трудоемок и не всегда обеспечивает гарантированный результат. Например, в работе [2] авторами был рассмотрен производственный дефект типа «закат», получивший быстрое развитие через 20 лет эксплуатации и обнаруженный при визуальном контроле внешней стенки трубы. При этом диагностика штатными способами показала ошибочные характеристики дефекта.

Определение расслоений и внутренних дефектов металла, так называемый контроль сплошности, проводится при помощи толщинометрии. Традиционный способ контроля с измерением и фиксацией отдельных показаний толщины стенки не дает целостной картины состояния металла по сечению трубы. Однако современные измери-

тельные устройства, оборудованные датчиками пути, позволяют осуществлять последовательный контроль с фиксацией результатов в автоматическом режиме. Авторами предлагается метод экспресс-анализа структуры металла на основе получаемых толщинограмм. Такой подход обеспечивает высокую степень автоматизации и качественное документальное подтверждение результатов контроля. На рисунке представлены толщинограммы секторов проконтролированных труб. Толщинограмма на рисунок *a* представляет бездефектный сектор трубы. На рисунке *б* имеются выраженные показания до середины номинальной толщины стенки, что связано с отражением сигнала от включений в ликвационной полосе. На рисунке *в* видны последовательные сливающиеся перепады толщин, дифференцированные по глубине, что характерно для расслоений.

Использование и анализ толщинограмм, кроме непосредственно толщинометрии, позволяет проводить экспресс-анализ качества структуры металла, определять наличие расслоений, ликвационных зон, их параметры и, соответственно, оценивать степень опасности.

Литература

1. European gas pipeline incident data group. Available at: [https://www.egig.eu/startpagina/\\$61/\\$108](https://www.egig.eu/startpagina/$61/$108) (accessed on 29.12.2019).
2. Анализ морфологии производственного дефекта металла магистральных газопроводов / Д. В. Жуков, С. В. Коновалов, А. В. Афанасьев, М. И. Васьков // Производство проката. – 2019. – № 9 – С. 33–38. – DOI: 10.31044/1684-257X-2019-0-9-33-38.

ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЗЕРЕН МИКРОСТРУКТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА

Волков С. С.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: volkovss48@yandex.ru*

Рассмотрена задача статистического материаловедения, изучающая влияние случайных свойств микроструктуры на деформационные свойства материала. Одним из источников неоднородности свойств микроструктуры является случайное распределение величины зерна. С уменьшением среднего диаметра зерна возрастает предел текучести материала, что выражается соотношением Холла–Петча [1]. Это соотношение рассмотрим как функцию случайного диаметра зерна микроструктуры. Зная плотность распределения вероятностей $f(x)$ диаметра зерна x , вычислим плотность распределения $g(y)$ предела текучести (прочности) y для зерен микроструктуры.

Рассмотрим в зерне $X = (x_1, x_2, x_3)$ разность между напряжением $\sigma(X)$ и случайным пределом прочности $S(X)$: $w(X) = \sigma(X) - S(X)$. Случайная величина $w(X)$ представляет собой микроструктурную функцию прочности. Распределение случайного напряжения $\sigma(X)$ вычисляется методами работы [2]. По закону распределения вероятностей функции прочности $w(X)$ находится вероятность разрушения элементов микроструктуры. Относительное число разрушенных элементов микроструктуры q равно вероятности превышения напряжением микроструктурного предела прочности. Поврежденность q вычисляется с помощью интеграла по положительному бесконечному интервалу от плотности распределения $f_w(x)$ функции прочности $w(X)$.

В процессе нагружения конструкции в материале накапливается поврежденность. С учетом поврежденности микроструктуры q на каждом этапе нагружения проводится перерасчет макросвойств материала [2]. В результате меняется зависимость между деформациями и напряжениями материала. При малых приращениях деформаций вычислена интегральная зависимость напряжений от изменяющихся свойств среды.

Приведены числовые примеры построения диаграмм деформирования с использованием данных эксперимента [3] по растяжению образцов из поликристаллической меди с различными размерами зерен. По математическим ожиданиям и дисперсиям диаметров зерен металла принимаются гипотезы о различных вариантах распределения случайных диаметров зерен металла. С учетом изменяющихся свойств материала вычислены диаграммы деформирования для нескольких вариантов свойств микроструктуры. Графики показывают влияние плотности распределения случайной величины зерна микроструктуры на зависимость между напряжениями и деформациями при нагружении. Проводится сравнение с экспериментальными диаграммами деформирования для меди с различными средними диаметрами зерен и различной дисперсией. Показано, что на расчет диаграммы деформирования влияют свойства микроструктуры материала, в том числе параметры распределения вероятностей величина зерна.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00339-мол а.

Литература

1. Панин В. Е., Елсукова Т. Ф., Гриняев Ю. В. Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, вып. 3. – С. 63–74.
2. Volkova T. A., Volkov S. S. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2009. – Vol. 52 (2). – P. 83–90. – DOI: 10.1016/j.tafmec.2009.08.007.
3. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. – М.: Наука, 1984. – 596 с.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН С ДВУХФАЗНЫМИ ГАЗОЖИДКОСТНЫМИ СРЕДАМИ

Сильников М. В.

Закрытое акционерное общество

«Научно-производственное объединение специальных материалов»

(ЗАО «НПО СМ») д. 28-а, Б. Сампсониевский пр., г. Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация,

e-mail: director@npo-sm.ru

Представлены пути и методы использования двухфазных газожидкостных сред для обеспечения безопасного применения импульсных высокоэнергетических технологий. Рассмотрено динамическое поведение ударных волн в двухфазных газожидкостных средах. Динамическое поведение ударных волн в двухфазных газожидкостных средах качественно отличается от распространения ударных волн в гомогенных средах типа газа и жидкости. Это связано с наличием развитых релаксационных зон межфазного взаимодействия газа с жидкостью и аномально высокой сжимаемостью газожидкостных систем по сравнению либо с жидкостью, либо с газом. Характерной особенностью ударноволновых процессов в газожидкостных средах является резкая зависимость параметров ударных волн от глубины протекания релаксационных процессов, обусловленная процессами межфазного взаимодействия и фазовых переходов.

Описаны реальные возможности регулирования параметров взрывных волн при детонации зарядов взрывчатых веществ в газах и жидкостях. Эффективные методы локализации действия взрыва и технические средства на их основе созданы за счет использования в качестве локализующих газожидкостных сред типа пузырьковых систем.

В качестве примеров использования структурированных релаксационных систем на основе двухфазных газожидкостных сред для защиты от внешних воздействий рассмотрены устройства для подавления поражающих факторов взрыва в атмосфере и под водой.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И КОБАЛЬТА

Сметанина К. Е.¹, Андреев П. В.^{1,2}, Ланцев Е. А.¹, Малехонова Н. В.¹, Востоков М. М.¹

¹ФАГОУ ВО ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
23, проспект Гагарина, г. Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация,
e-mail: smetanina-ksenia@mail.ru

²ФГБУН Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых,
49, ул. Тропинина, г. Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация,
e-mail: andreev@ihps.nnov.ru

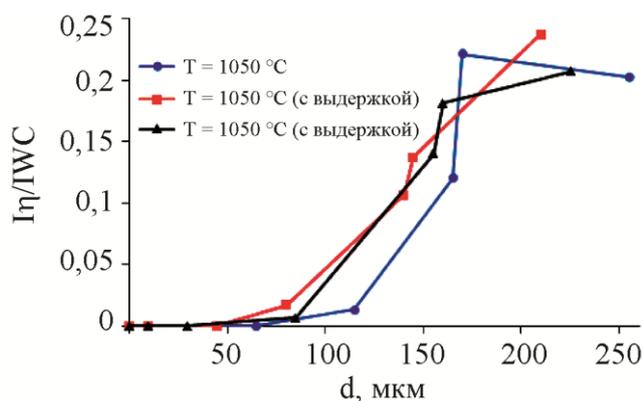
Твердые сплавы на основе карбида вольфрама и кобальта характеризуются высокой прочностью и износостойкостью, что позволяет использовать их в качестве металлорежущего инструмента. Дальнейшее повышение механических свойств данных материалов связано с задачей об однородности их фазового состава.

Сплавы получают путем электроимпульсного плазменного спекания порошков. Спекание осуществляется в графитовых пресс-формах. Окисление поверхности порошка приводит к дефициту углерода в спекаемом объеме, вследствие чего в процессе спекания могут образовываться η -фазы ($\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}$). Наличие этих фаз в сплавах приводит к снижению их износостойкости и трещиностойкости [1]. Диффузия углерода с графитовых деталей может привести к тому, что поверхностный слой не будет содержать η -фаз, но на некотором расстоянии от поверхности эти фазы могут существовать.

Была исследована зависимость концентрации η -фазы по глубине керамических образцов, полученных в разных режимах спекания.

Объектами исследования стали керамические образцы, спеченные из порошка WC, полученного методом плазмохимического синтеза, и Co, осажденного на поверхность частиц WC [2], в количестве 10 % мас. Спекание осуществлялось на установке «Dr. Sinter model SPS-625» в вакууме ($V = 50$ °C/мин, $P = 70$ МПа) при $T = 1050$ °C, два образца – с изотермической выдержкой при 850 °C в течение 10 мин для оценки повторяемости.

Далее проводился послойный фазовый анализ: с поверхности спеченных образцов посредством механической шлифовки удалялись слои одной толщины, затем происходила полировка алмазной пастой до дисперсности частиц 1/0 мкм.



Распределение отношения $I_{\eta(511)}/I_{WC(111)}$ по глубине исследуемых образцов

Рентгенодифракционные эксперименты проводились на порошковом дифрактометре «Shimadzu XRD-7000» ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1,54$ Å). Условия съемки: «режим широкой щели» в диапазоне углов 30 – 80° с шагом сканирования $0,04$ и временем экспозиции 3 с [3].

Были построены зависимости отношения интенсивностей аналитических пиков $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C} - (511)$ и $\text{WC} - (111)$ от суммарной величины удаленного слоя (рисунок). Таким образом, подтверждается гипотеза о том, что углерод в процессе спекания диффундирует с графитовых деталей в поверхностные

слои, обеспечивая в них отсутствие η -фазы. Глубина диффузии углерода составляет $\Sigma 100$ мкм. Нижеследующие слои характеризуются дефицитом углерода, который способствует образованию η -фазы ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках гранта № 18-73-10177.

Литература

1. Курлов А. С., Гусев А. И. Физика и химия карбидов вольфрама. – М. : Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 272 с.
2. Получение нанопорошков карбидов и твердосплавных смесей с применением низкотемпературной плазмы / Н. В. Исаева, Ю. В. Благовещенский, Н. В. Благовещенская, Ю. И. Мельник, А. В. Самохин, Н. В. Алексеев, А. Г. Асташов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2013. – № 3. – С. 7–14.
3. Андреев П. В., Сметанина К. Е., Ланцев Е. А. Рентгеновское исследование фазового состава мелкозернистых керамических материалов на основе карбида вольфрама // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – № 85 (8). – С. 37–42.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ СТАЛЬНОГО ШАРИКА С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ВЫРАЩЕННОЙ МЕТОДОМ ХГН И ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

Фомин В. М.^{а)}, Голышев А. А.^{б)}, Косарев В. Ф.^{в)}, Оришич А. М.^{г)}, Филиппов А. А.^{д)}

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
4/1, ул. Институтская, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}fomin@itam.nsc.ru; ^{б)}alexgol@itam.nsc.ru; ^{в)}vkos@itam.nsc.ru;
^{г)}laser@itam.nsc.ru; ^{д)}filippov@itam.nsc.ru*

Снижения удельного веса различных защитных элементов является актуальной задачей на сегодняшний день. В настоящее время разрабатываются гетерогенные и градиентные материалы на основе различных металлов и керамик. Существует большое количество методов получения металломатричных композитных покрытий: спекание, холодное газодинамическое напыление (ХГН), селективное лазерное плавление, плазменное напыление, электронно-лучевая наплавка и др. [1–3]. В настоящей работе исследуется комбинированный метод получения металломатричного композиционного покрытия на основе В4С и Ti, заключающийся в последовательном применении методов ХГН и лазерной обработки.

Обработка лазерным излучением покрытий, полученных методом ХГН, осуществлялась на созданном в ИТПМ СО РАН комплексе «Сибирь 1», включающем непрерывный СО2-лазер с мощностью до 5 кВт и параметром качества пучка $K = 0,7$ [4].

Экспериментальное исследование свойств материалов проводилось с использованием процесса высокоскоростного взаимодействия ударника с материалом. Ускорение ударников до скоростей 1150 м/с осуществлялось с использованием электродинамического ускорения масс (ЭДУМ). В качестве подложки брали пластину из титанового сплава ВТ20 с размерами 50×50×5 мм, а в качестве ударника использовали стальной шарик с диаметром 5 мм и весом 0,5 г.

Профилограммы образуемых кратеров после ударного воздействия стальным шариком с помощью оптического конфокального микроскопа Olympus Lext.



Образец ХГН покрытия с последующей обработкой лазерным излучением после соударения с шариком

По результатам работы получено, что нанесенное ХГН-покрытие приводит к уменьшению кратера в подложке на 30 % по сравнению с мишенью без дополнительного покрытия. А обработанное ХГН-покрытие лазерным излучением уменьшает кратер в 2 раза (рисунки).

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда «Физические основы создания гетерогенных материалов с помощью аддитивных технологий» № 16-19-10300.

Часть работы связанная с нанесением ХГН-покрытия и исследованиями с ЭДУМ, выполнена с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 19-48-543004_p_mol_a..

Литература

1. Создание гетерогенных материалов на основе порошков В4С и Ni методом холодного газодинамического напыления с последующим послойным лазерным воздействием / В. М. Фомин, А. А. Гольшев, В. Ф. Косарев А. Г. Маликов, А. М. Оришич, Н. С. Ряшин, А. А. Филиппов, В. С. Шикалов // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58, № 5. – С. 218–227. – DOI: 10.15372/PMTF20170522.
2. Meng Q. W., Geng T. L., Zhang B. Y. Laser cladding of NI-base composite coatings onto TI-6AL-4V substrates with pre-placed B4C+NiCrBSi powders // Surface Coatings Technol. – 2006. – Vol. 200. – P. 4923–4928.
3. Гольшев А. А., Оришич А. М., Филиппов А. А. Законы подобия лазерной наплавки металлокерамических покрытий // Прикладная механика и техническая физика. – 2019. – Т. 60, № 4. – С. 194–205. – DOI: 10.15372/PMTF20190421.
4. Энергетика высококачественной резки стали волоконным и СО2-лазерами / В. М. Фомин, А. А. Гольшев, А. М. Оришич, В. Б. Шулятьев // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58, № 2. – С. 212–220. – DOI: 10.15372/PMTF20170223.

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ И АСИММЕТРИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА $(\text{CoCrFeNi})_{94}\text{Ti}_2\text{Al}_4$

Сараева А. А., Победенная З. В., Киреева И. В., Чумляков Ю. И.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Сибирский физико-технический институт,
пл. Новособорная, 1, Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: Anastasia16-05@yandex.ru*

На монокристаллах высокоэнтропийного сплава $(\text{CoCrFeNi})_{94}\text{Ti}_2\text{Al}_4$, ориентированных вдоль $[001]$, $[\bar{1}44]$, $[\bar{1}11]$ направлений, при деформации растяжением и сжатием исследована температурная и ориентационная зависимость критических скалывающих напряжений $\tau_{\text{кр}}$, стадийность кривых течения и механизм разрушения.

Температурная зависимость $\tau_{\text{кр}}(T)$ монокристаллов сплава $(\text{CoCrFeNi})_{94}\text{Ti}_2\text{Al}_4$ при деформации растяжением и сжатием в температурном интервале $T = 77\text{--}973\text{ К}$ состоит из двух участков, характерных для деформации скольжением ГЦК-твердых растворов замещения. При $T < 373\text{ К}$ наблюдается сильная температурная зависимость $\tau_{\text{кр}}(T)$, превышающая температурную зависимость модуля сдвига $G(T)$, а при $T > 373\text{ К}$ $\tau_{\text{кр}}(T)$ зависят от температуры как $G(T)$. Установлено, что $\tau_{\text{кр}}$ в исследованном интервале температур $T = 77\text{--}973\text{ К}$ при растяжении и сжатии не зависят от ориентации кристалла и в кристаллах одной ориентации не зависят от способа деформации растяжения/сжатия. Следовательно, закон Боаса–Шмида выполняется. Это качественно подтверждается отсутствием зависимости от ориентации и способа деформации дислокационной структуры после небольшой степени деформации 2,5 % скольжением.

Не смотря на то, что ориентационная зависимость и асимметрия $\tau_{\text{кр}}$ отсутствует, стадийность кривых течения, коэффициент деформационного упрочнения $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$, пластичность и уровень напряжений до разрушения зависят от ориентации и способа деформации. Максимальный эффект деформационного упрочнения при растяжении, связанный с развитием двойникования в двух системах одновременно со скольжением, наблюдается в $[\bar{1}11]$ -кристаллах при 77 К. В $[\bar{1}44]$ -кристаллах при развитии двойникования в одной системе одновременно со скольжением деформационное упрочнение при 77 К оказывается значительно меньше, чем в $[\bar{1}11]$ -кристаллах. При растяжении подавление процессов поперечного скольжения и образование шейки по условию Консидера при развитии двойникования в одной системе одновременно со скольжением увеличивает протяженность стадии линейного упрочнения и пластичность в $[\bar{1}44]$ -кристаллах до 70 %. При растяжении пластичность в $[\bar{1}44]$ -кристаллах в 2–3 раза превышает пластичность $[\bar{1}11]$ -кристаллов, но при этом уровень напряжений перед разрушением оказывается близким 900–1000 МПа. В результате сильной температурной зависимости $\tau_{\text{кр}}^{\text{СК}}(77\text{ К})/\tau_{\text{кр}}^{\text{СК}}(296\text{ К}) = 1,6\text{--}1,8$ в $[\bar{1}11]$ - и $[\bar{1}44]$ -кристаллах с повышением температуры испытания $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$ и напряжения до разрушения падают, а пластичность меняется слабо относительно 77 К. При развитии деформации только скольжением в $[001]$ - кристаллах $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$ и напряжения до разрушения оказываются меньше, чем при двойниковании. Разрушаются кристаллы вязко.

Установлено, что при деформации сжатием в $[\bar{1}11]$ -кристаллах с самого начала деформации развиваются локализованные полосы макроскопического сдвига с разориентацией в полосе на углы 8–10° относительно матрицы. В $[001]$ -кристаллах полосы локализованной деформации не наблюдаются. Обсуждаются физические причины появления полос локализованной деформации, связанные с множественностью сдвига, тонкой структурой скользящих дислокаций и механизмом деформации – скольжением и двойникованием.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-19-00217.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРИРОДНОГО ФЕРРИТА ЖЕЛЕЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Иванченко В. С., Глухих И. И.

*ФГБУН Институт геофизики Им. Ю. П. Булашевича
Уральского отделения Российской академии наук (ИГФ УрО РАН),
100, ул. Амундсена, г. Екатеринбург, 620149, Российская Федерация,
e-mail: ivanchenko_05@mail.ru*

В работе приведены данные по использованию методов неразрушающего контроля, в частности магнитоакустической эмиссии (МАЭ) для исследования магнетитовых руд различного генезиса.

В качестве исследуемых параметров МАЭ использованы: значения намагничивающего поля, при которых наблюдаются максимумы значений магнитоакустической эмиссии; амплитуда этих максимумов; диапазон намагничивающего поля, в котором наблюдается магнитоакустическая эмиссия; значение магнитного поля, соответствующее половине диапазона магнитного поля проявления магнитоакустической эмиссии (медианное значение). Детально изучены параметры магнитоакустической эмиссии монокристалла магнетита из зеленых сланцев (Средний Урал). Показана зависимость амплитуды и формы сигнала от амплитуды, частоты намагничивающего магнитного поля и от анизотропии. На небольшом количестве образцов измерена магнитоакустическая эмиссия магнетитовых руд некоторых месторождений и массивов: Естюнинского, Абаканского, Магнитогорского, Сарбайского, Ново-Песчанского, Рай-Из, Таштагол. Установлено различие информационных параметров сигналов магнитоакустической эмиссии для различных генетических типов железорудных месторождений. Проведено детальное исследование на Таштагольском месторождении, где были исследованы образцы магнетитовых руд из подземных зон, подвергшихся сильным деформационным процессам. Исследовано влияние внутренних и внешних напряжений на амплитуду сигналов МАЭ, которая зависит от содержания магнетита в образце неоднозначно, и связана с наличием внутренних напряжений.

Особенно резкие различия по магнитоакустической эмиссии наблюдаются на сплошных магнетитовых рудах, где проявляются магматический, метасоматический и скарновый процессы. Форма сигналов МАЭ, а также диапазон намагничивающего поля, зависят от степени однородности магнетита и от присутствия других магнитных минералов. Оруденелые породы и бедные вкрапленные руды, где магнетит представлен малотитанистой высокотемпературной разновидностью, по параметрам магнитоакустической эмиссии практически не различаются.

Также на форму сигнала МАЭ (количество максимумов и их соотношение) влияет наличие нескольких генераций магнетита. При исследовании природных ферритмагнетиков, где отмечается несколько источников магнитоакустической эмиссии, вводится понятие активности источника (или фазы) магнитоакустической эмиссии, определяемой как площадь, ограниченная кривой магнитоакустической эмиссии, величиной магнитного поля, для которого наблюдается максимум сигнала.

Проект 18-5-5-52 Разработка петрофизических методов исследований горных пород и руд с целью изучения геологического строения месторождений и совершенствование методов их поиска и разведки

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЭТАПНОЙ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ТОНКОСТЕННОГО СОСУДА И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Келлер И. Э.¹, Казанцев А. В.², Адамов А. А.¹, Петухов Д. С.¹, Трофимов В. Н.²,
Оборин А. Н.³, Чугайнов С. Б.⁴

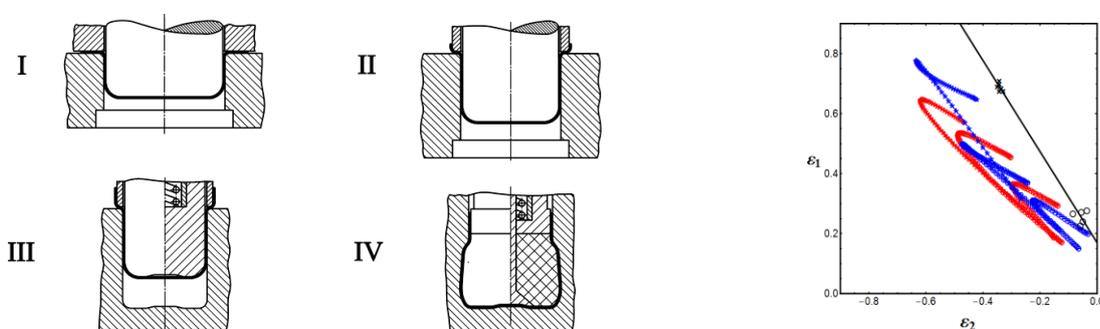
¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, 1,
ул. Акад. Королева, 614013, Пермь, Российская Федерация,
e-mail: kie@icmm.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский пр-т, 614990, Пермь, Российская Федерация,
e-mail: alexkazancev@bk.ru

³Лысьвенский завод эмалированной посуды,
1, ул. Металлистов, 618909, Лысьва, Российская Федерация

⁴Лысьвенский завод бытовой техники,
1, ул. Металлистов, 618900, Лысьва, Российская Федерация

Построена и аттестована численная модель холодной штамповки тонкостенных изделий из анизотропного металлического листа для проектирования технологических операций. Используются соотношения ассоциированного закона пластического течения с функцией текучести Барлата и изотропным деформационным упрочнением, для идентификации которых реализована оригинальная методика проведения и обработки эксперимента. Кривая предельных деформаций аппроксимирована численно методом Марциньяка–Кучинского, а для ее идентификации предложено использовать тест на разрушение при одноосном растяжении и технологический процесс в качестве экспериментального оборудования. Для этого на плоскую заготовку лазерной гравировкой была нанесена координатная сетка, по искажению которой вблизи зон локализации деформации и разрушения сосуда найдены дополнительные точки кривой предельных деформаций. Для описания упругости полиуретанового штампа при больших деформациях с помощью испытаний на свободное и стесненное сжатие найдены константы потенциала Пенга–Ландела. Все испытания согласно методике выполнены для малоуглеродистой листовой стали марки DC04ЕК толщиной 0,7 мм и полиуретана СКУ-ПФЛ. Построена численная модель процесса в пакете LS-DYNA® с использованием моделей материалов из его библиотеки. Расчеты согласно модели подтверждены экспериментом, для чего по искаженной координатной сетке на заготовке после каждой операции в контрольных точках определяли главные деформации. Выполнен расчет последовательности этапов вытяжки и раздачи заготовки при производстве чайника с учетом и без учета промежуточного отжига и определены опасные зоны и закономерности их формирования. Обнаружена существенная непропорциональность траекторий деформаций (рисунок) контрольных точек боковой поверхности сосуда, поэтому выполнен уточненный расчет пластического разрушения с использованием эволюционного критерия Джонсона–Кука, идентифицированного по кривой предельных деформаций для простых траекторий нагружения.



Последовательность технологических операций и траектории деформаций контрольных точек (синий – расчет, красный – эксперимент)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта совместного конкурса РФФИ и правительства Пермского края (проект № 17-48-590310).

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ И МОНИТОРИНГ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОМ

Матвиенко Ю. Г.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
4, М. Харитоньевский пер., г. Москва, 101000, Российская Федерация,
e-mail: ygmavienko@gmail.com*

Предупреждение разрушений и обеспечение безопасности сложных технических систем на современном этапе развития науки во многом определяется адаптацией основных положений современной теории управления к постановке и решению проблем живучести. Теория управления на базе физико-математических и имитационных моделей повреждений и разрушений позволяет изучать динамические процессы, протекающие в технических системах под воздействием механических нагрузок, температурных полей и коррозионно-активных сред, а также устанавливать структуру и параметры составных частей системы для придания реальному процессу управления желаемых свойств и заданного качества. При этом значительное внимание уделяется разработке и изучению методов и средств систем управления ресурсом, включая мониторинг критически важных элементов технических систем. В качестве одной из основных задач теории управления в проблемах безопасности и ресурса следует рассматривать задачу анализа кинетики повреждений технических систем на модельном или физическом уровне.

Общая постановка и решение системных фундаментальных и прикладных задач безопасности и риска объектов машиностроения основана на учете их прямой количественной связи с постановкой задач предупреждения разрушений и управления ресурсом, в качестве составной части которой могут быть рассмотрены трещиностойкость, живучесть и надежность.

Сформулированы фундаментальные принципы, модели и методы многокритериального связного анализа, обеспечения и управления ресурсом машин и конструкций в междисциплинарных проблемах машиностроения [1–3]. С общих позиций обоснованы расчетно-экспериментальные подходы к анализу ресурса, живучести и безопасности машин и конструкций, включающие следующие характеристики: комплексный анализ прочности, ресурса, живучести и безопасности; комплексные многопараметрические модели и критерии нелинейной механики разрушения на различных масштабных уровнях; методы экспериментального определения характеристик нелинейной механики разрушения на нестандартных образцах и элементах натуральных конструкций; мониторинг и диагностика повреждений и разрушений, локация трещиноподобных дефектов; физико-математическое и имитационное моделирование; инженерно-технологические аспекты современной механики разрушения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00351).

Литература

1. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
2. Матвиенко Ю. Г. Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. – Москва–Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2015. – 56 с.
3. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / под ред. Н. А. Махутова, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Романова. – Москва : ЛЕНАНД, 2018. – 720 с.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЕРСПЕКТИВНОГО AL-ZN-MG-FE-NI СПЛАВА ПРИ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Бродова И. Г., Ширинкина И. Г., Петрова А. Н.

*Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: brodova@imp.uran.ru*

В последние годы среди алюминиевых сплавов нового поколения наиболее подробно исследуются разработанные в МИСиС сплавы, получившие название никалины. Их высокие прочностные свойства обеспечиваются дисперсионно-твердеющей Al матрицей, содержащей цинк и магний, а хорошие литейные свойства и высокая технологичность создается за счет эвтектической составляющей, в состав которой входят алюминиды железа и никеля. Данные сплавы позиционируются как перспективные материалы для изготовления отливок сложной формы, а также как деформируемые сплавы для получения тонколистового проката. Алюминиевые сплавы относятся к материалам, которые по своему назначению используются в экстремальных условиях. В связи с этим, важным остается вопрос о создании оптимального комплекса механических и физических свойств, обеспечивающих безаварийную работу этих материалов в статических и динамических условиях. Известно, что существует прямая взаимосвязь между свойствами и структурой сплавов, которые можно варьировать в широких пределах деформационно-термической обработкой. Цель настоящей работы – изучить деформационное поведение никалина при разных условиях нагружения и определить взаимосвязь механических свойств со структурой материала.

Объектом исследования служил высокопрочный никалин, химический состав которого, мас. %: основа – Al, 7,22 Zn; 2,95 Mg; 0,52 Fe; 0,57Ni; 0,2 Zr; 0,002 Cu. Для получения образцов с СМК-структурой применяли метод кручения под высоким квазигидростатическим давлением (КВД) дисков диаметром 20 и 10 мм. Образцы для КВД предварительно подвергались разной термической обработке (закалке или гомогенизационному отжигу) для изучения влияния фазового состава на механизмы интенсивной пластической деформации. Установлено, что при КВД происходит интенсивное измельчение структуры до нанокристаллического (НК) или субмикроструктурного (СМК) уровня в зависимости от величины накопленной деформации и предварительной термической обработки. Проведен контроль упрочнения СМК композита по характеристикам твердости. Построены зависимости микротвердости от величины деформации (числа оборотов наковальни n) и установлено повышение твердости в 1,5–2,0 раза относительно крупнокристаллического (КК) аналога. Аналогичная картина была получена при анализе механических свойств СМК-композита, определенных при статическом растяжении. Свойства СМК-композита превышают прочностные характеристики КК аналога ($\sigma_{0,2}$ на 150 %; σ_B на 50 %) с сохранением хорошей пластичности ($\delta = 7$ %). Выполнен эксперимент по ударно-волновому сжатию образцов никалина в СМК состоянии, и определены динамические свойства материала в разном структурном состоянии, полученном при изменении величины деформации. Сравнение с динамическими характеристиками КК никалина показывает, что измельчение структуры сплава до субмикронного масштаба приводит к существенному росту σ_{HEL} и Y в 1,8–2,0 раза.

Изучена последовательность и кинетика постдеформационных процессов при нагреве НК и СМК никалина в интервале температур от 100 до 400 °С (возврата, старения и рекристаллизации). Установлено, что в интервале температур $t \leq 200$ °С процесс распада пересыщенного твердого раствора протекает одновременно с термическим разупрочнением. Сплав, полученный КВД, сохраняет наноструктурную основу и имеет твердость, в два раза превышающую закаленное состояние за счет высокого зернограничного и дисперсионного упрочнения. Рост температуры до 300–400 °С приводит к активному протеканию статической рекристаллизации (непрерывной или прерывистой), типичной для полученной КВД смешанной структуры, состоящей из деформационных кристаллов и динамически рекристаллизованных зерен.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура», № АААА-А18-118020190116-6) и проекта РФФИ № 18-03-00102.

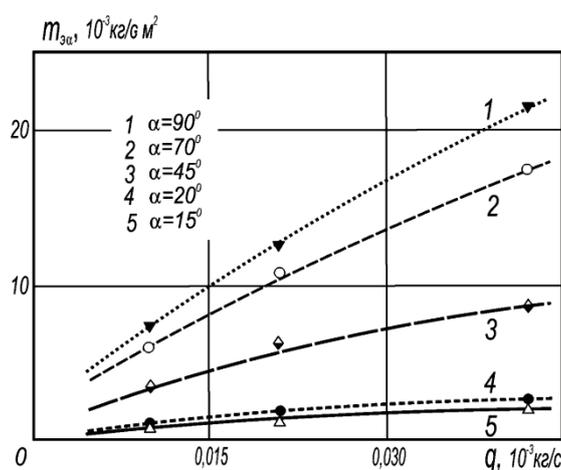
ОЦЕНКА РЕСУРСА КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЭРОЗИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ПОТОКА

Зинин А. В.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
4, Волоколамское шоссе, г. Москва, 125993, Российская Федерация,
e-mail: allzin@yandex.ru

Опыт применения полимерных композитных материалов (ПКМ) в конструкциях авиационной техники показывает, что на ресурсных характеристиках деталей из ПКМ негативно сказывается абразивное воздействие пылегазовой смеси, образующейся на этапах взлета и посадки при забросе песка и мелких осколков аэродромного покрытия, в экстремальных полевых условиях пустынь и пылевых бурь и др. Механизмы разрушения при абразивной эрозии изучены недостаточно даже для традиционных металлических материалов [1, 2], а исследования эрозионного износа конструкционных композитных материалов и расчетные методики оценки ресурсных показателей с учетом этого явления практически отсутствуют.

В проведенном ранее экспериментальном исследовании [2] в качестве важнейшего фактора, определяющего интенсивность разрушающего действия эрозионного потока, отмечено направление движения абразивных частиц относительно поверхности контакта – угол атаки α . Предложен критерий эрозионной стойкости ПКМ – массовая скорость эрозионного разрушения $m_{3,\alpha}$ (кг/м²·с), зависящая от концентрации q абразива в смеси (рисунок).



Влияние угла атаки на эрозионную стойкость углепластика

Влияние угла атаки определяется не только очевидным различием в уровне энергии деформации при ударе под разными углами, но и изменением механизмов разрушения поверхностного слоя полимерного материала в зависимости от геометрических условий контакта с движущейся частицей абразива. Установлены три возможных процесса, приводящих к эрозионному повреждению, – ударные повреждения (impact), усталость (fatigue) и процессы резания (cutting), при которых начальная энергия частицы преобразуется в различные энергетические условия, приводящие к образованию и развитию микротрещин в компонентах ПКМ.

Расчетные модели оценки ресурсных показателей могут быть сформированы в рамках многопараметрической механики разрушения [3], предоставляющей возможность совместного описания процессов накопления рассеянных повреждений, зарождения и развития макротрещин при ударных или циклических нагрузках. Такие модели могут включать многие параметры, характеризующие как степень нагруженности и износа материала, так и геометрические особенности рассеянных или межслойных трещин. Формализация такого подхода в

виде сопоставления обобщенной силы продвижения и обобщенной силы сопротивления продвижению трещины различной природы позволяет прогнозировать долговечность при газоабразивном воздействии для различных механизмов эрозионного разрушения в терминах традиционных категорий механики разрушения и усталостной прочности.

Литература

1. Разрушение и износ композитных материалов при взаимодействии с потоком абразивных частиц / Т. Д. Каримбаев, Ю. А. Ножницкий, В. И. Гундаров, Л. С. Рысин, В. Г. Лютцау, И. А. Тарасов // Механика композитных материалов. – 1980. – № 2. – С. 235–240.
2. Износ и эрозионная стойкость композитных элементов авиационного двигателя в газоабразивном потоке / А. В. Зинин., С. В. Добровольский, А. К. Лебедев, В. А. Крупенников, А. О. Шевяков // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2019. – № 4. – С. 156–162.
3. Котов П. И., Зинин А. В., Сухов С. В. Практическая механика разрушения : в 2 т. – М. : МАТИ, 2012. – Т. 2. – 216 с.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОЛСТОСТЕННОЙ СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ КОНТАКТА С ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДОЙ

Емельянов И. Г.¹, Огорелков Д. А.^{1,2}

¹Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация

²УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, Российская Федерация

С использованием численных и экспериментальных методов решена физико-механическая задача расчета напряженного состояния стальной толстостенной оболочки вращения в условиях механического нагружения и с учетом контакта с водородосодержащей средой. Действующие напряжения и их инварианты определяются решением физически нелинейной краевой задачи в трехмерной пространственной постановке. Показано, как учитывать эффект изменения механических параметров стали под влиянием воздействия водорода, при определении напряженно-деформированного состояния различных стальных конструкций, которые работают при контакте с водородом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 18-38-00339_мол_а.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ СТАЛИ 09Г2С ПРИ УЧЕТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА

Емельянов И. Г., Миронов В. И.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

Предложен метод определения влияния агрессивной водородосодержащей среды на предел прочности стали. Для этого проведен эксперимент на растяжение образца из стали 09Г2С после процесса наводороживания его при повышенной температуре. Поскольку процессы теплопередачи и диффузии водорода в металле имеют различные физические времена, но описываются одинаковыми по структуре уравнениями, в предлагаемом подходе используется хорошо разработанной математический аппарат решения задач теплопроводности для решения задачи диффузии водорода в металл. Результаты численного решения уравнений теплопроводности и диффузии позволяют получить уравнение описывающее изменение временного сопротивления для данной стали в зависимости от концентрации водорода в ней.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 18-38-00339_мол_а.

ВЛИЯНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ НА РЕЗОНАНСНУЮ АМПЛИТУДУ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННОЙ БАЛКИ

Миронов В. И.¹, Огорелков Д. А.^{1,2}, Лукашук О. А.²

¹Институт машиноведения УрО РАН,

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

²УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,

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

Использование низко модульного пеноматериала, способного к интенсивному поглощению энергии колебаний, заключается в снижении их числа и амплитуды при динамических внешних воздействиях. Вычислительные эксперименты в среде Solid Works [1] и натурные испытания [2] с построением виброграмм изгибных затухающих колебаний тонкостенной консольной балки показали, что объемное демпфирование пеноматериалом может быть эффективным средством гашения *свободных* колебаний. В работе исследуется влияние демпфирования на резонансную амплитуду *вынужденных* колебаний балки. В оценочном проектном расчете предлагается использовать аналитическое выражение для определения логарифмического декремента затухающей балки и расчетные данные по собственным частотам, полученные в каком-либо вычислительном комплексе. Прогнозируется значительное снижение резонансной амплитуды установившихся вынужденных колебаний затухающей балки при изгибе, что указывает на эффективность объемного демпфирования тонкостенной балки пеноматериалом не только при свободных, но и при вынужденных изгибных колебаниях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 18-38-00339_мол_а.

Литература

1. Mironov V., Lukashuk O., & Ogorelkov D. Two Approaches to the Problem of High-cycle Fatigue of Materials and Structures // 2018 International Conference on Materials Science and Manufacturing Engineering (MSME 2018) (MATEC Web of Conferences) / ed. by D. Bassir. – 2019. – Vol. 253. – P. 01004. – DOI: 10.1051/mateconf/201925301004.
2. Mironov V. I., Ogorelkov D. A., Lukashuk O. A. Using power-consuming materials for volume damping of thin-walled structural elements // 2019 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019) (MATEC Web of Conferences). – 2019. – Vol. 298. – P. 00043. – DOI: 10.1051/mateconf/201929800043.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕСУРСА СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Альшанская А. А.¹, Доронин С. В.^{1,2}

¹ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
д. 95, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», г. Красноярск, 660025, Российская Федерация,
e-mail: alshanskaya_anna@inbox.ru

²Институт вычислительных технологий СО РАН (Красноярский филиал),
д. 53, пр. Мира, г. Красноярск, 660049, Российская Федерация,
e-mail: sdoronin@ict.nsc.ru

Расчет сварных соединений при проектировании стальных конструкций технических объектов является важнейшей составляющей обеспечения их функциональных свойств, характеристик прочности и надежности. Методы расчета сварных соединений хорошо разработаны, введены в программы профессионального образования и широко используются при анализе силовых конструкций строительных [1] и машиностроительных [2–5] объектов. Эти методы основаны на предположении, что силовой поток, воспринимаемый сварным соединением и непосредственно сварным швом, известен и может быть описан комплексом внутренних силовых факторов – усилий и моментов. Однако определение значений этих силовых факторов для структурно-сложных конструкций, содержащих большое количество разнотипных сварных соединений (суммарная длина сварных швов может достигать десятков и сотен метров), в общем случае не является тривиальной задачей.

Цель работы – разработка и практическая апробация информационно-вычислительной технологии получения индивидуальных оценок нагруженности сварных соединений элементов структурно-сложных конструкций для анализа прочности и прогнозирования ресурса. Технология используется в рамках любого современного пакета конечно-элементного моделирования (CAE-системы) и предполагает естественную декомпозицию конструкции – представление ее в виде суммы деталей, соединяемых сваркой. Объединение в единую силовую деформируемую систему осуществляется с использованием специальных граничных условий – связей, в которых по результатам численного анализа могут быть определены силовые реакции. Именно эти реакции рассматриваются в качестве индивидуальных характеристик нагруженности каждого сварного соединения. Далее получают интервальные оценки прочности и ресурса сварных швов двумя методами – в соответствии с классическими подходами [1–5] и численным анализом в трехмерной постановке напряженного состояния сварного шва с учетом всех его геометрических особенностей. На последнем этапе устанавливаются конкретные сварные соединения, лимитирующие прочность и надежность структурно-сложной конструкции, и принимаются конструкторско-технологические решения по их обеспечению. Апробация методики выполнена на примере крупногабаритной структурно-сложной конструкции двуногой стойки карьерного экскаватора в широком диапазоне внешних воздействий на рабочее оборудование.

Таким образом, предложена и апробирована технология получения индивидуальных расчетных оценок нагруженности сварных швов структурно-сложных силовых конструкций для прогнозирования их прочности и ресурса.

Литература

1. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81.
2. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М. : Высшая школа, 1982. – 272 с.
3. Николаев Г. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование. – М. : Высшая школа, 1990. – 446 с.
4. Серенко А. Н., Крумбольдт М. Н., Багрянский К. В. Расчет сварных соединений и конструкций. – Киев : Вища школа, 1977. – 336 с.
5. Рыбаков В. М. Сварка и резка металлов. – Высшая школа, 1979. – 214 с.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ МАРШРУТИЗАЦИИ: ТЕОРИЯ И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ (АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА, МАШИНОСТРОЕНИЕ)

Ченцов А. Г.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского
Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН)
д. 16, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация*

Исследуется задача последовательного обхода мегаполисов (непустых конечных множеств) с условиями предшествования и функциями стоимости, зависящими от списка заданий. Возможные варианты применения: задача о демонтаже радиационно опасных объектов при авариях на АЭС, подобных Чернобылю и Фукусиме [1]; задача управления инструментом при листовой резке на машинах с ЧПУ [2, 3]; задача авиапожарного патрулирования лесных массивов; различные транспортные задачи с многими пунктами посещения. Рассматривается проблема минимизации аддитивного критерия, компонентами которого являются стоимости внешних перемещений, внутренних работ (имеются в виду работы, связанные с посещением мегаполисов) и терминального состояния [4]; упомянутые компоненты суммируются. Оптимизируется точка старта, способ нумерации заданий по посещению мегаполисов и конкретная траектория процесса. Для поиска оптимального решения используется широко понимаемое динамическое программирование (ДП); при реализации ДП в условиях предшествования насчитывание всего массива значений функции Беллмана не производится, что позволяет экономить ресурсы памяти. Для решения задач большой размерности ДП используется при оптимизации в «окнах» в режиме вставок [5] и мультывставок [6] (имеется в виду локальное улучшение эвристик).

Литература

1. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций / В. В. Коробкин, А. Н. Сесекин, О. Л. Ташлыков, А. Г. Ченцов. – М. : Новые технологии, 2012. – 234 с.
2. Петунин А. А. О некоторых стратегиях формирования маршрута инструмента при разработке управляющих программ для машин термической резки материала // Вестник УГАТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – Т. 13. № 2 (35). – С. 280–286.
3. Ченцов А. Г., Ченцов П. А. Маршрутизация в условиях ограничений: задача о посещении мегаполисов // Автомат. и телемех. – 2016. – №11. – С. 96–117. (Autom. Remote Control. – 2016. – Vol. 77 (11). – P. 1957–1974).
4. Ченцов А. Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. – М.-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 240 с.
5. Ченцов А. Г. Оптимизирующие вставки в задачах маршрутизации и их реализация на основе динамического программирования // Вестн. Удмуртск. ун-та. Матем. Мех. Компьют. науки. – 2016. – 26 (4). – P. 565–578.
6. Ченцов А. Г., Григорьев А. М. Оптимизирующие мультывставки в задачах маршрутизации с ограничениями // Вестн. Удмуртск. ун-та. Матем. Мех. Компьют. науки. – 2018. – 28 (4). – P. 513–530.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ТРУБНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Данилов С. В.¹, Урцев Н. В.², Масленников К. Б.², Урцев В. Н.², Лобанов М. Л.^{1,3}

¹УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: s.v.danilov@bk.ru

²ИТЦ «Аусферр», д. 18, ул. Горького, г. Магнитогорск, 455000, Российская Федерация

³ИФМ металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация

В настоящее время проблема повышения трещиностойкости стальных изделий в основном определяется не вероятными местами зарождения трещин, а возможностью их легкого распространения на расстояния сопоставимые с размерами изделия. Последнее определяется как морфологической (формы, размеры), так и локальной кристаллографической (ориентировки) характеристиками зерен в изделиях. В работах [1–3] показано, что трещиностойкость листов трубных сталей после контролируемой термомеханической обработки (ТМСР – Thermo-Mechanical Controlled Processing), сочетающей в себе контролируемую прокатку и последующее ускоренное контролируемое охлаждение, определяется наличием и количеством зерен с ориентировкой $\{001\}\langle 110\rangle$.

В большинстве трубных изделий интегральная кристаллографическая текстура является следствием определенной последовательности технологических воздействий, при которых в материале реализуются структурные и фазовые превращения. А именно, горячая деформация осуществляется, в основном, в аустенитной области, при последующем охлаждении реализуется $\gamma \rightarrow \alpha(\alpha')$ превращение по диффузионному, промежуточному или сдвиговому механизмам.

В работе показано, что склонная к разрушению компонента текстуры $\{001\}\langle 110\rangle$ может формироваться в результате горячей прокатки полуфабрикатов в двухфазной $\gamma + \alpha$ -области, без протекания рекристаллизации феррита или как результат бейнитного или бейнитно-ферритного превращения, протекающего в центральных слоях изделия. Данные слои охлаждаются с наименьшими скоростями. Кроме того, в низкоуглеродистых сталях данные слои являются обогащенными ферритобразующими элементами как следствие фазовой ликвации, формирующейся в процессе их кристаллизации.

В работе также показано, как сложная кристаллографическая текстура деформации аустенита преобразуется в малокомпетентную текстуру ОЦК-решетки с выполнением определенных ориентационных соотношений (ОС), промежуточных между ОС Курдюмова–Закса и ОС Нишиямы–Вассермана. При этом зарождение новой ОЦК-фазы происходит на специальных (кристаллографически обусловленных) высокоугловых границах. Подобное явление наблюдалось в аустенитной стали X18H9 [4]. При ТМСР специальные границы формируются между стабильными ориентировками деформированных аустенитных зерен в процессе горячей прокатки [1].

Текстурные исследования в работе выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00135 мол_а.

Литература

1. Splitting susceptibility in modern X80 pipeline steels / A. Gervasyev, I. Pyshmintsev, R. Petrov, C. Huo, F. Barbaro // Materials Science and Engineering A. – 2020. – Vol. 772. – P. 138746 (1–17). – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138746.
2. Влияние кристаллографической структуры бейнита на разрушение листов трубных сталей, полученных контролируемой термомеханической обработкой / И. Ю. Пышминцев, А. О. Струин, А. М. Гервасьев, М. Л. Лобанов, Г. М. Русаков, С. В. Данилов, А. Б. Арабей // Металлург. – 2016. – № 4. – С. 57–63.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАЗОМКНУТОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С МАЛОЙ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССОЙ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ КРЕПЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ

Добрышкин А. Ю., Мин Ко Хлайнг, Сысоев О. Е., Сысоев Е. О.

*Комсомольск-на-Амуре государственного университета,
27, пр. Ленина, Комсомольск-на-Амуре, 681013, Российская Федерация,
e-mail: minkohlaing53@gmail.com*

Конструкции из тонкостенных разомкнутых оболочек с заземленными опорными краями находят все более широкое распространение при строительстве зданий и сооружений ввиду архитектурной выразительности, а также в других отраслях промышленности в связи с высокой экономической эффективностью. На эти конструкции устанавливаются присоединенные массы (балконы, кондиционеры, козырьки, смотровые площадки, контейнеры и т. п.), которые являются причиной запуска динамических процессов, взаимодействия изгибных и радиальных колебаний. Поэтому требуются новые уточненные математические модели расчета колебаний тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек, с начальными неправильностями формы, а также их экспериментальная проверка.

Работа отражает исследования вынужденных колебаний тонкой прямоугольной в плане разомкнутой оболочки, с граничными условиями «свободный край – подвижная заделка». Для исследования подготовил образец, представляющий собой разомкнутую оболочку, прямоугольную в плане, из алюминиевого сплава Д19. Геометрические характеристики объекта: $L = 890$ мм; $B = 370$ мм; $H = 0,4$ мм. Схема проведения эксперимента изображена на рисунке.

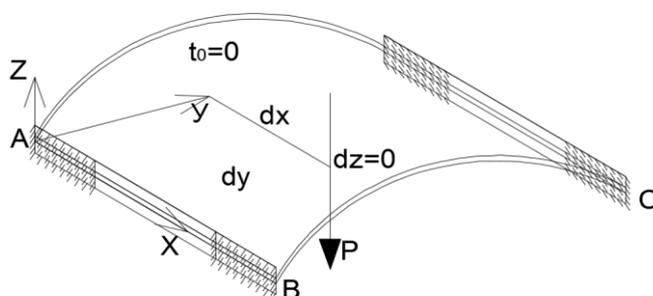


Схема действия сил

Стенд для проведения экспериментов имеет прямоугольную форму и изготовлен из равнополочных уголков $L45 \times 3$ из стали Ст3сп, изготовленных согласно ГОСТ 8509-93. Присоединенную массу представляет акселерометр BC110, расположенный на центре образца. Акселерометр BC110 измеряет частоту колебаний с высокой точностью в диапазонах от $0,5 \dots 10\,000$ Гц и имеет чувствительность 100 мВ/г. Датчик измерения колебаний BC 110 направляет электрический импульс на усилитель аналогового сигнала, который, усиливая электрический сигнал, передает его по линиям электропередач далее на АЦП (аналогово-цифровой преобразователь). Цифровой сигнал по цепи поступает на персональный компьютер. Датчик работает по принципу определения магнитной составляющей окружающей среды, расположен на расстоянии от оболочки не более 2 мм. Программное обеспечение «Z-lab» позволяет отображать и записывать колебания в режиме реального времени. Воздействие на оболочку внешних сил позволяет получать в испытательном стенде экспериментальные зависимости частотной характеристики колебаний оболочки и величины присоединенной массы. Изучение вынужденных колебаний разомкнутой оболочки позволяет предотвратить

разрушения реальных оболочечных конструкций. Вынужденные колебания создавались с помощью удара испытательным молотком AU03.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по проверке новых математических моделей вынужденных колебаний разомкнутой тонкостенной цилиндрической оболочки с малой присоединенной массой и граничными условиями «свободный край – подвижная заделка». Рассмотрены влияние геометрических размеров участков смешанных граничных условий на частоту собственных колебаний. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что наличие небольших участков свободного края не влияет существенно на частоту собственных колебаний. По результатам исследований можно использоваться для предотвращения опасности из-за случая приводящих к разрушению конструкции и техногенным катастрофам.

К ПРИМЕНЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Разумовский И. А.¹, Чернятин А. С.², Пилипенко Г. С.³

¹НИМАШ РАН,

4, М. Харитоньевский пер., Москва, 101000, Российская Федерация,

e-mail: murza45@gmail.com

²ООО «НИИ Транснефть»,

³МГТУ им. Н.Э. Баумана

В докладе представлена возможность оценки поверхностных напряжений (активных, остаточных, начальных) на основе математической обработки полей остаточных перемещений, обусловленных динамическим индентированием и зарегистрированных современными оптико-цифровыми методами (методом ЭЦСИ). В основе методики – поиск минимума целевой функции, комплексно отражающей расхождение значительных массивов экспериментальных данных (полей перемещений поверхности u_x^*, u_y^*, u_z^*) и результатов серии расчетов модельных задач при различных значениях искомых параметров (искомых напряжений s_x, s_y) [1, 2].

Перспективность решения аналогичной задачи методом статического индентирования была обоснована в работе [3]. Однако применение этой методики в реальных условиях вызывает принципиальные трудности, связанные с необходимостью разработки для каждого объекта исследования специального нагружающего устройства, что практически трудно реализуемо. Использование в качестве способа индентирования динамического нагружения исследуемого объекта [4] позволяет избежать указанных трудностей

На первом этапе исследования решалась задача создания банка откликов [1, 2], где в качестве выборки выступают результаты расчетов серии прямых задач о динамическом взаимодействии упругого стального сферического индентора с упругопластическим полупространством в следующей постановке: вдоль боковых граней полупространства (материал – алюминиевый сплав NL) действуют напряжения s_x, s_y , величины которых варьировались от –200 МПа до 200 МПа. Скорость индентора в момент его соприкосновения с поверхностью V варьировалась от 20 до 200 м/с. Расчеты выполнялись МКЭ с использованием ПК ANSYS Workbench.

На втором этапе с использованием соответствующего модуля, разработанного авторами программного комплекса [1–3], было выполнено решение обратной задачи (задачи определения вектора $P = \{s_x, s_y\}$ на основе обработки массива псевдоэкспериментальных данных по полям тангенциальных перемещений u_x^*, u_y^*). Расчеты проведены для различных сочетаний: искомых напряжений, скорости индентирования, объема и зоны локализации исходной информации (количества точек измерений – N), компонент вектора перемещений. Для каждой комбинации параметров задачи было проведено не менее 100 расчетов, в которых выполнялась статистическая оценка влияния погрешности величин исходных перемещений (относительная погрешность варьировалась в пределах $\delta_e = \pm 20\%$) и первоначальной оценки искомых величин ($s_x^b, s_y^b = \pm 20\%$).

Анализ результатов показывает, что при использовании в качестве исходной экспериментальной информации полей перемещений u_x^*, u_y^* разработанная методика и программа позволяют надежно определять искомые напряжения s_x, s_y . При этом при рассмотренных вариациях параметров δ_e, s_x^b, s_y^b требуется использование не менее 100 точек измерений. Отметим, что, с учетом чувствительности метода ЭЦСИ к тангенциальным перемещениям ($\sim 0,37$ мкм/полосу интерференции) для получения такого массива экспериментальных данных достаточно иметь глубину максимальных остаточных перемещений $u_{max} < 3\text{--}4$ мкм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 18-19-00351.

Литература

1. Разумовский И. А., Чернятин А. С. Методология и программа для исследования напряженно-деформированного состояния с использованием интерференционно-оптических и численных методов // *Машиностроение и инженерное образование*. – № 4. – 2009. – С. 26–32.
2. Chernyatin A. S., Razumovskii I. A. *Strength of materials*. – 2013. – Vol. 45 (4). – P. 506–511. – DOI: 10.1007/s11223-013-9486-6.
3. Чернятин А. С., Разумовский И. А. Метод индентирования как способ оценки нагруженности и деградации механических характеристик материала // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2015. – № 4. – С. 40–48.
4. Рудницкий В. А., Рабцевич А. В. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов // *Дефектоскопия*. – № 4. – 1997. – С. 79–86.

ФОРМИРОВАНИЕ КАРБИДОВ В СТАЛИ 15Х2МФА, МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ НИОБИЕМ

Теплухин В. Г.¹, Цветков А. С.^{1,2}, Попов А. И.¹, Шабалин Д. Н.¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
29, Политехническая улица, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация,
e-mail: cornfield@yandex.ru

²НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,
49, Шпалерная, Санкт-Петербург, 191015, Российская Федерация

Несмотря на имеющиеся результаты подробных исследований сохраняется высокий интерес к фазовым превращениям в сталях типа 15Х2МФА [1–2], что связано прежде всего с длительным сроком эксплуатации ответственных изделий, изготавливаемых из этих сталей, и с необходимостью оценки ресурса их эксплуатации, который определяется стабильностью структуры материала.

Рассмотрена стабильность карбидных фаз в сталях данного типа, дополнительно легированных ниобием, после различных видов основной и послесварочной термической обработки (таблица).

Режимы термической обработки

Маркировка пробы	Режим термической обработки
А	Основная термическая обработка – закалка 1000 °С, отпуск 670 °С, 30 ч
В	Основная + послесварочная (655–660 °С, 21 ч 20 мин + 670–675 °С, 20 ч)
С	Основная + послесварочная (655–660 °С, 21 ч 20 мин + 670–675 °С, 30 ч)
Д	Основная + послесварочная (655–660 °С, 21 ч 20 мин + 680–685 °С, 20 ч)
Е	Основная + послесварочная (655–660 °С, 21 ч 20 мин + 700–705 °С, 20 ч)

Установлено, что повышение продолжительности или температуры окончательного послесварочного отпуска относительно штатных параметров не приводит к существенным изменениям общего количества карбидной фазы. Содержание хрома, молибдена и ванадия в карбидном осадке стабилизируется и выходит на «насыщение». Увеличение температуры и продолжительности дополнительного послесварочного отпуска оказывает на существенное влияние содержание ниобия (рис. 1). При увеличении температуры отпуска содержание ниобия в карбидном осадке возрастает, но также достигает «насыщения» (пробы С, D и E).

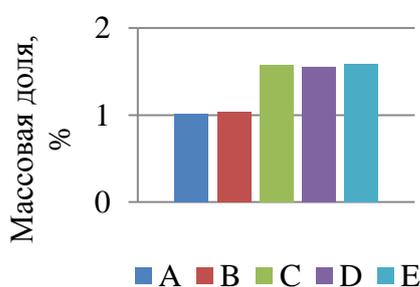


Рис. 1. Содержание ниобия в пробах карбидного осадка

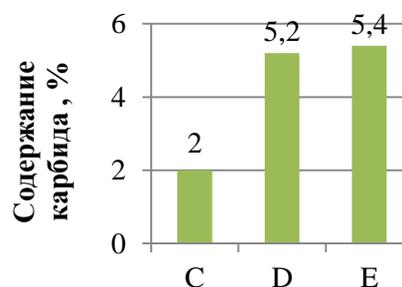


Рис. 2. Содержание карбида ванадия в фазовом осадке

В пробах С, D и E в составе порошка карбидного осадка обнаруживается наличие одинаковых фаз – карбид Me_7C_3 , содержащий Fe, Cr и Mo, карбид ванадия VC и карбид ниобия NbC. В количественном отношении значительно изменяется только содержание карбида ванадия (рис. 2). При этом количество VC также стабилизируется.

Полученные результаты показывают возможность стабилизации структуры стали за счет получения устойчивых карбидов, что обеспечивает стабильность механических характеристик стали при эксплуатации и ресурсные характеристики оборудования.

Литература

1. Структурные исследования сталей корпусов реакторов для нового поколения реакторов типа ВВР / Б. А. Гурович, Е. А. Кулешова, А. С. Фролов, Д. А. Журко, Д. Ю. Ерак, Д. А. Мальцев, В. М. Комолов // Вопросы атомной науки и техники. – 2013. – № 2 (84). – С. 69–75.
2. Carbide precipitation in 2.25 Cr-1 Mo bainitic steel: Effect of heating and isothermal tempering conditions / S. Дйпиной, C. Toffolon-Masclat, S. Urvoy, J. Roubaud, B. Marini, F. Roch, E. Kozeschnick, A. F. Gourgues // Metall. Mater. Trans: A. – 2017. – Vol. 48. – P. 2164–2178. – DOI: 10.1007/s11661-017-4045-6.

РОЛЬ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ В ПОЛУЧЕНИИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ СПЛАВАМИ Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr

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

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

Современное развитие технологических процессов требует новых материалов, наиболее перспективными являются наноматериалы, которые во много зависят от механизма получения ультрадисперсных частиц, обладающих ценными эксплуатационными свойствами.

Цель работы – установление взаимосвязи различных механизмов формирования наноструктуры и размерных эффектов с универсальными функциональными свойствами покрытий сплавами Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr.

Основные требования: 1) для сплава Fe-Ni – высокая микротвердость, низкая хладостойкость, высокая коррозионная стойкость в морской воде, наноструктура и размерные эффекты; 2) для сплава Co-Mn – высокое содержание фазы α -Co, фазы α -Mn, и небольшое количество аморфной фазы (АФ) $\text{Co}(\text{OH})_2$, наноструктура; 3) для сплава Ni-Cr – высокая микротвердость, наноструктура, заданный фазовый и химический состав.

Основные методы получения – высокочастотный переменный ток (ВПТ), стационарный метод (СМ). Методы исследования структуры: зондовая атомно-силовая микроскопия (АСМ), электронная микроскопия.

Механизм получения размерных эффектов: 1) сплав Fe-Ni – образование новой фазы ε -Fe, поликристаллы этой ГПУ-фазы состоят из параллельных нанопластин $d = 10$ нм; 2) сплав Co-Mn – образование при осаждении АФ – $\text{Co}(\text{OH})_2$, АФ препятствует росту зародышей, образуя вокруг них нанокольца.

Механизм получения наноструктуры: сплав Ni-Cr – использование различных добавок (карбамид для $\text{Ni}_{75}\text{-Cr}_{25}$ и Н-кислоты для $\text{Cr}_{62}\text{-Ni}_{38}$). При $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ формированию ультрадисперсных частиц способствовали мультислойные пленки $\text{Cr}(\text{OH})_3 \cdot (\text{H}_2\text{O}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, вызывающие торможение процесса электрокристаллизации.

В случае сплава $\text{Cr}_{62}\text{-Ni}_{38}$ (Н-кислота) образуется дополнительная фаза NiO наряду с α -Cr и β -Ni, способствующая измельчению кристаллов.

Установлено, что решающее значение в получении размерных эффектов (8–12 нм) имеют метод получения ВПТ, наличие новой ГПУ-фазы ε -Fe, и образующейся в процессе осаждения регулируемого количества аморфной пленки $\text{Co}(\text{OH})_2$.

Получить наноструктурные покрытия возможно за счет управления фазовым и химическим составами сплава, использованием специальных добавок, наличия АФ.

Выводы. Получены покрытия с заданными свойствами:

1. Fe-Ni – $d = 10$ нм, фаза ε -Fe, микротвердость $\text{HV} = 1600$ МПа, $T_{\text{хр}} = -120$ °С, глубинный показатель коррозии $K_{\text{п}} = 0,6$ мкм/год. Рекомендовано в качестве защитно-коррозионного, хладостойкого покрытия для нефтегазодобывающего оборудования в условиях Арктики.

2. Co-Mn – $d = 12$ нм, фазы α -Co \gg α -Mn + $\text{Co}(\text{OH})_2$, $\text{HV} = 555$ МПа, текстура [1120], коэрцитивная сила $H_c = 1050$ А/м.

3. $\text{Ni}_{75}\text{-Cr}_{25}$ – $d = 50\text{--}100$ нм, $\text{HV} = 985$ МПа, фазы β -Ni + β -Co + $\text{Cr}(\text{OH})_3 \cdot (\text{H}_2\text{O}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{Cr}_{62}\text{-Ni}_{38}$ – с α -Cr и β -Ni + NiO. Применение – резисторные и тензорезистивные элементы.

ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ И НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Вильдеман В. Э.^{а)}, Староверов О. А.^{б)}, Третьяков М. П.^{в)}

Центр экспериментальной механики

Пермского национального исследовательского политехнического университета,

15, Академика Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация,

e-mail: ^{а)}wildemann@pstu.ru; ^{б)}cem_staroverov@mail.ru; ^{в)}cem.tretyakov@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния предварительных циклических и низкоскоростных продольных и поперечных ударных воздействий на остаточные прочностные, деформационные и усталостные характеристики полимерных композитов. Выявлено, что для исследуемых стеклопластиковых образцов, изготовленных на основе препрега ВПС-48 и связующего ВСЭ 1212 со схемой армирования $[0^\circ/90^\circ]_n$, вид зависимости остаточных статических прочностных и жесткостных свойств от наработки предварительного циклирования имеет нелинейный характер. Данные зависимости приведены в виде диаграмм усталостной чувствительности [1]. Реализовано исследование усталостной чувствительности стеклопластиковых образцов с различными схемами армирования $[0/90]_n$, $[0/30/0/60]_n$, $[\pm 45]_n$ и параметрами циклического воздействия $\sigma_{\max} = (0,4-0,6) \cdot \sigma_{\text{УВ}}$ при нормальных и повышенных 120 °С температурах. В результате анализа опытных данных выявлено, что стадийный характер изменения остаточных прочностных и деформационных свойств стеклопластиков характерен для образцов, у которых в структуре присутствуют направления армирования, совпадающие с приложением нагрузки. Кривые, описывающие изменения остаточной жесткости стеклопластиковых образцов с различными параметрами воздействия имеют схожий вид и близкие значения [2]. Анализ результатов испытаний при повышенных температурах показал, что по сравнению с образцами, испытанными при комнатной температуре, снижение значения остаточного предела прочности происходило в две стадии без участка начальной усталостной чувствительности [3].

С целью исследования влияния предварительного ударного растяжения стеклопластиковых образцов проведена серия экспериментов с различными уровнями потенциальной энергии нагружения [4]. По результатам опытных данных можно сделать вывод, что ударное воздействие в направлении армирования не оказывает влияния на остаточную прочность и усталостную долговечность исследуемых стеклопластиковых образцов. При ударном воздействии поперек слоев и последующем квазистатическом растяжении выявлено наличие порогового значения ударной чувствительности, до достижения которого снижения остаточной прочности стеклопластика не наблюдалось. Также при увеличении энергии предварительного ударного изгиба происходило изменение механизмов разрушения образцов с нормального отрыва на отрыв с расслоением в продольном направлении.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00069) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

1. Wil'deman V. E., Staroverov O. A., Lobanov D. S. Diagram and parameters of fatigue sensitivity for evaluating the residual strength of layered GFRP composites after preliminary cyclic loadings // *Mechanics of Composite Materials*. – 2018. – Vol. 54 (3). – С. 313–320.
2. Experimental study of the influence of preliminary complex mechanical loads on the deformation and strength properties of polymer composites / O. A. Staroverov, V. E. Wildemann, M. P. Tretyakov, A. S. Yankin // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. 18. – P. 757–764.
3. Lobanov D. S., Staroverov O. A. The fatigue durability GFRP under increased temperatures // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. 17. – P. 651–657.

4. Wildemann V. E., Staroverov O. A., and Tretyakov M. P. Deformation and failure of polymer composite materials under preliminary cyclic and low-velocity impacts // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, International Conference of Young Scientists and Students “Topical Problems of Mechanical Engineering” (ToPME-2019) 4–6 December 2019, Moscow, Russia. – 2019. – Vol. 747.

ДИАГНОСТИКА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ ТОРСИОНОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ С ВНУТРЕННЕЙ СИЛОВОЙ ФУНКЦИЕЙ

Юркевич А. В.¹, Юркевич Л. Н.²

¹Институт машиноведения УрО РАН,
62, Пролетарская, Курган, 640000, Российская Федерация,
e-mail: urkeva@mail.ru

²Курганский государственный университет,
63, стр. 4, Советская, Курган, 640020, Российская Федерация,
e-mail: alisa_yurkevich@mail.ru

Новый тип механических бесступенчатых передач [1] имеет внутренние звенья, совершающие колебательные движения, механические выпрямители и упругие элементы – торсионы, при деформации которых возникают силовые функции. В эксплуатации под нагрузкой передаточное отношение изменяется бесступенчато за счет упругой деформации ε_i торсионов (силовой функции) и принудительного регулирования их амплитуды φ_0 колебаний. Путем независимого изменения φ_0 и частоты ω вращения вала ДВС, электронной системой управления [2] обеспечивается оптимальная нагрузочная характеристика ДВС [3]. Принципы такого управления подробно исследовались при выполнении гранта РФФИ 16-08-00717.

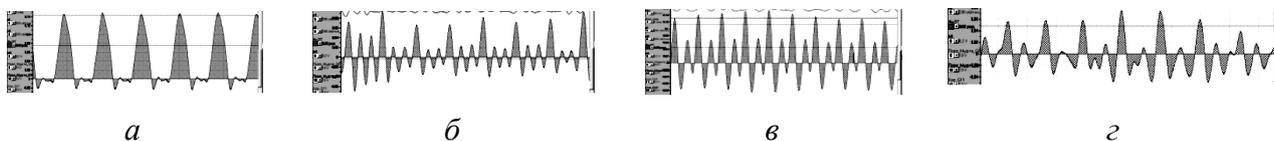
Диагностика и эксплуатационный контроль за деформациями необходимы: для текущей диагностики состояния торсионов – отсутствия остаточных деформаций; для контроля и управления амплитудой φ_0 , ограниченной напряжениями $\tau_{0,2}$ материала торсиона (сталь 45ХН2МФА); для обоснования термических и технологических мероприятий повышения τ_{-1} торсионов, а также для исследования эксплуатационных нагрузочных режимов в характерных условиях движения АТС, необходимых для прогнозных оценок долговечности передачи.

Теоретическое [1] значение ε_i зависит от нагружающего передаточное отношение внешнего сопротивления M_c через внутреннее передаточное отношение $i_T (M_c)$ и определяется по формуле

$$\varepsilon_i = \varphi_0 \cdot [\cos(\omega \cdot t_1) - \cos(\omega \cdot t) - i_T \cdot \omega \cdot (t - t_1)]$$

Расчет по формуле показывает, что характер цикла ε_i имеет пульсирующий характер (асимметрия $R = 0$) при любом значении M_c . В эксплуатации эти деформации могут иметь существенно другой характер. Экспериментальное их определение – цель данной работы.

Фрагменты осциллограмм эксплуатационных деформаций ε_i торсионов (рисунок) и анализ результатов их обработки (таблица) позволяют сделать следующие основные выводы.



Фрагменты осциллограмм в характерных эксплуатационных режимах: *a* – «стоповый» – колеса не вращаются; *b* – «тяговый» – преодоление значительного сопротивления; *v* – «разгон» – движение с ускорением; *z* – «эксплуатационный» – движение по городу

Экспериментальные значения средних параметров циклов деформаций торсиона (рад)

Параметр цикла	Режимы движения АТС			
	Стоповый	Тяговый	Разгон	Эксплуатация
Среднее ε_m	0,041	0,017	0,015	0,011
Амплитудное ε_a	0,043	0,045	0,078	0,029
Асимметрия R	-0,044	-0,785	-0,711	-0,695

1. Упрочнение торсионного вала путем заневоливания нецелесообразно, поскольку $R < 0$.
2. Требуется текущий контроль и ограничение деформации торсионов системой управления.
3. Полученные в процессе испытаний экспериментальные выборки деформаций, могут быть использованы для расчетной оценки прочностной надежности торсионов передачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-08-00717.

Литература

1. Благонравов А. А. Механические бесступенчатые передачи. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 202 с.
2. Yurkevich A. V., Tereshin A. V., and Soldatkin V. A. Electronic Control System of Continuously Variable Type of Mechanical Transmission Named After Blagonravov // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 1–4 Oct., 2019. – IEEE, 2019. – P. 1–7. – DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934163.
3. Blagonravov A. A., Yurkevich A. B., Yurkevich A. A. Automatic control of a stepless mechanical transmission with an internal force function. // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37 (3). – P. 185–188. – DOI: 10.3103 / S1068798X17030054.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕДУР МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ТОРСИОНОВ ПЕРЕДАЧИ БЛАГОНРАВОВА

Юркевич А. В.¹, Юркевич Л. Н.²

¹Институт машиноведения УрО РАН,
62, Пролетарская, Курган, 640000, Российская Федерация,
e-mail: urkeva@mail.ru

²Курганский государственный университет,
63, стр. 4, Советская, Курган, 640020, Российская Федерация,
e-mail: alisa_yurkevich@mail.ru

Вероятность безотказной работы P показатель надежности деталей машин, функционирующих при случайном нагружении [1]. Это относится и к торсионам передачи Благонравова [2]. За вероятность их безотказной работы принимается вероятность превышения предела выносливости материала торсион τ_{-1} над действующими напряжениями, приведенным к эквивалентным симметричным. Используя функции неразрушимости по А.Р. Ржаницыну [3] вероятность отказа $P_{отк}$ определяется интегрированием $f_{\psi}(\psi) \cdot d\psi$ – плотность распределения случайной величины $\psi = \tau_{-1} - \varphi | \tau_m | + K \tau_a$ представляющей собой композицию случайных величин, τ_{-1} , τ_m – среднее и τ_a – амплитудное значения действующего цикла. Исследования этой передачи, в рамках грантов РФФИ: Урал 01-01-96448, 05-08-50058, 16-08-00717 позволили создать экспериментальный образец и провести его испытания в составе ходового макета транспортного средства. На рис. 1. в одном масштабе представлены результаты обработки методом размахов деформаций ε торсиона (прямо пропорциональных напряжениям τ), выполненной в ПО «PowerGraph».

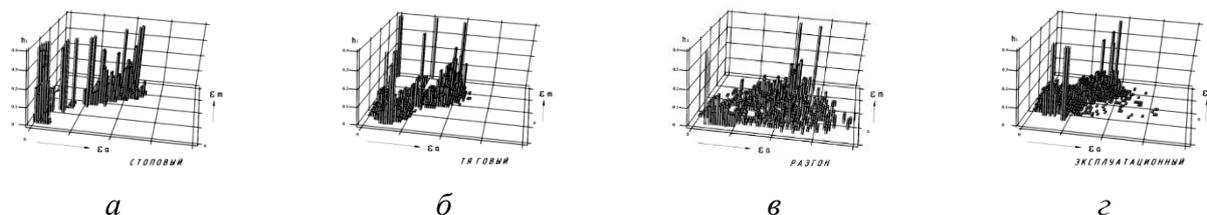


Рис. 1. Двухпараметрические гистограммы экспериментальных деформаций торсионов в характерных эксплуатационных режимах: *a* – «стоповый» – колеса не вращаются; *б* – «тяговый» - преодоление значительного сопротивления; *в* – «разгон» – движение с ускорением; *г* – «эксплуатационный» – движение по городу

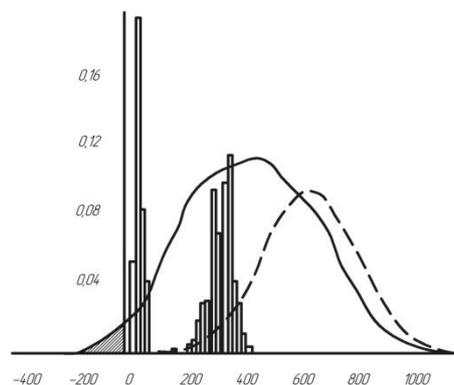


Рис. 2. Использование функции неразрушения $f_{\psi}(\psi)$ для определения вероятности безотказной работы торсионов на «стоповом» режиме

Анализ этих графиков показывает, что значения ε_m и ε_a коррелированы, при этом дисперсии $D\varepsilon_a$ зависят от режима движения p и условной вероятности $P(\varepsilon_a|\varepsilon_m)$. Поэтому при расчете функции $f_{\psi}(\psi)$ известными методами [3, 4] процесс становится весьма трудоемким.

В связи с этим в работе предлагается методика расчета, использующая процедуры Монте-Карло [5]. Сущность метода в том, что случайным образом разыгрывают значения $\varepsilon_m | p$, $\varepsilon_a | \varepsilon_m$, из соответствующей гистограммы (рис. 1). Далее с ними производят действия по зависимости ψ . Результат – одна реализация процесса. Набор таких реализаций формирует выборку генеральной совокупности функции $f_\psi(\psi)$. При розыгрыше выбирают значение равномерно распределенной от 0 до 1 случайной величины γ_i . Получение величины x_i с заданным гистограммой распределением, получают решением $\gamma_i = \sum_0^x h_i(\varepsilon_i) \cdot \Delta\varepsilon$. Требуемое количество испытаний N находят, используя уравнение $P\left\{\left|\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x - \bar{m}_x\right| < \frac{3 \cdot \bar{\sigma}}{\sqrt{N}}\right\} \approx 0,997$. Данная методика реализована в процессоре MathCad. На рис. 2 представлены результаты расчета. Вероятность отказа на этом режиме, (заштрихованная площадь), составляет 1,28 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-08-00717; грант РФФИ-Урал № 05-08-50058; грант РФФИ-Урал № 01-01-96448.

Литература

1. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З. Надежность машин : учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / под ред. Д. Н. Решетова. – М. : Высш. шк., 1988. – 237 с.
2. Благодравов А. А. Механические бесступенчатые передачи. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 202 с.
3. Прочность и долговечность автомобиля / Б. В. Гольд, Е. П. Оболенский, Стефанович Ю. Г., Трофимов О. Ф.; под. ред. Б. В. Гольда – М. : Машиностроение, 1974. – 328 с.
4. Сызранцева К. В. Расчет прочностной надежности деталей машин при случайном характере внешних нагрузок. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. – 88 с.
5. Савелова Т. И. Метод Монте-Карло : учеб. пособие. – М. : НИЯУ МИФИ, 2011. – 152 с.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОТВЕТСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ НЕОДНОРОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Махутов Н. А., Макаренко И. В., Макаренко Л. В.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
д. 4, М. Харитоньевский пер., г. Москва, 119334, Российская Федерация,
e-mail: I.V.Makarenko@yandex.ru*

Законы безопасности и живучести на основе линейной и нелинейной механики разрушения лежат в основе современных методов проектирования и прогнозирования ресурса эксплуатации элементов ответственного оборудования. Соответствующие принципы основываются на допущении наличия начальных, возникших на разных стадиях эксплуатации, и развивающихся, инициируя разрушение детали, разноориентированных дефектов типа трещин.

Для критерия распространения трещины в упругом теле используются на базе линейной механики разрушения критические коэффициенты интенсивности напряжений K_{IC} , K_{IIC} , K_{IIIC} , инвариантный критический J_c -интеграл и раскрытие трещин δ . В нелинейной механике разрушения связь между этими критериями оказывается более сложной, зависящей от условий нагружения и механических свойств в упругой и неупругой области.

При расчете на сопротивление разрушению элементов конструкций с учетом исходных разноориентированных дефектов типа поверхностных полуэллиптических трещин необходимо учитывать одновременное взаимодействие условия охлаждения и нагрева, процесс упругопластического деформирования, поля остаточных напряжений и деформаций от сварки. Важной становится кинетика перераспределения напряженно-деформированных состояний в процессе нагружения за счет изменения физико-механических свойств материала, температуры и длины трещин ℓ .

В результате исследований получены функции изменения средне интегральных величин предела текучести и предела прочности зон сварного соединения в зависимости от температуры и распределения механических свойств по всему объему соединения.

Определяющими становятся критические коэффициенты интенсивности деформаций в зависимости от толщины, температуры, зоны сварного соединения и ориентации трещин.

На основе математической модели пространственного распределения механических свойств получены расчетные кинетические зависимости для развивающихся наклонных поверхностных малоцикловых полуэллиптических трещин в соответствующих зонах сварного соединения.

В докладе приведены предельные функции и параметры разрушения от температуры (T), толщины (t), числа циклов нагружения N и угла наклона трещин (α) соединения, как для металла сварного шва, так и для зоны сплавления, применимые для сварного соединения аустенитной нержавеющей стали типа X18H9, позволяющие определять допускаемые размеры исходных разноориентированных поверхностных полуэллиптических трещин.

Тогда, согласно выражениям $\bar{K}_{Ie} = f(\bar{K}_I, \alpha, T, t, \ell) \leq \bar{K}_{IeC}$ для коэффициента интенсивности деформаций, регламентируются размеры допускаемых дефектов.

В результате, на основе деформационного критерия разрушения, расчетно-экспериментального, численного и аналитического методов сформулированы основные положения и общая методология проведения уточняющего расчета прочности и живучести деталей конструкций и сварных элементов ответственного оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-00572-а.

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ В НЕРАЗЪЕМНОМ СОЕДИНЕНИИ ИЗ СТАЛИ 45

Абашкин Е. Е.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук,
д. 1, ул. Metallургов, Комсомольск-на-Амуре, 681000, Российская Федерация,
e-mail: abashkine@mail.ru*

На сегодняшний день электродуговой способ сварки является самым распространенным методом получения неразъемного соединения металлоконструкций, для создания которого требуется жесткое соблюдение режимов теплового воздействия в процессе локального оплавления и последующего охлаждения зоны стыка соединяемых элементов. Локальный перегрев зоны соединения приводит к изменению геометрической точности сборки металлоконструкции и изменению твердости материала в зоне термического влияния, что воздействует на прочностные качества соединения.

Для решения этой проблемы предложено использовать порошковую проволоку с алюмотермитным наполнителем для автоматической сварки под слоем флюса. Данный наполнитель состоит из смеси фракций металлической окалины и алюминиевого сплава с добавлением лигатур. Дополнительная тепловая энергия экзотермической реакции и образующийся металл предположительно будут способствовать равномерному наполнению сварочной ванны, а дополнительные теплоизоляционные свойства образовавшегося шлака приведут к более медленному и, соответственно, равномерному затвердеванию (кристаллизации) материала шва, что улучшает качество получаемых неразъемных соединений по сравнению с традиционной электродуговой сваркой проволокой сплошного сечения.

Цель исследований – определение эффективности комбинированного теплового режима, влияющего на зону неразъемного соединения пластин из стали 45 и наплавляемого металла путем совмещения электродугового и алюмотермического теплового воздействий, а также на формирование геометрии получаемого изделия и твердости в зоне термического влияния по сравнению с традиционной технологией получения неразъемных соединений.

Экспериментальная отработка режимов комбинированного теплового воздействия осуществлялась наплавлением металла на пластины толщиной 12 мм встык. Процесс наплавки осуществляется при помощи агрегата АДФ-1000-5Е.

По результатам исследования выявлено, что минимальными значениями амплитуды деформационных отклонений по оси относительно базовой поверхности обладают соединения из стали 45, полученные комбинированным тепловым воздействием. Значение амплитуды максимальных отклонений на 6 % меньше, чем при традиционном способе. Значения твердости полученных соединений значительно не отличаются. Твердость материала возрастает от центра наплавляемого металла шва по направлению к основному металлу и принимают в конце зоны термического влияния требуемые величины твердости стали 45, которые соответствует показателям HRA = 56 ед.

Таким образом, экспериментально установлено, что применение комбинированного теплового воздействия на АДФ-агрегате при помощи порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем обладает технологическим преимуществом в сравнении с вариантами получения неразъемного соединения традиционным способом сварки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-18-50343.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Бобров А. Л., Бехер С. А., Рыжова А. О.

*ФГБОУ ВО СГУПС,
191, ул. Дуси Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация,
e-mail: beaver@stu.ru*

Своевременное обнаружение усталостных трещин и других повреждений бурильных труб позволяет существенно снизить затраты на бурильные работы. В противном случае разрушения системы бурения в процессе работ приводят не только к прямым потерям труб, но и к увеличению времени бурильных работ и другим косвенным потерям. Поэтому построение эффективной системы обнаружения усталостных трещин в резьбовом соединении и контроль их развития до предельного состояния могут повысить качество и снизить себестоимость бурильных работ.

В работе дан анализ выявляемости дефектов в резьбовой части строительных бурильных труб (более 95 % от всех выходов из строя в процессе эксплуатации) визуальными, оптическими, магнитопорошковыми, вихретоковыми, капиллярными и ультразвуковыми методами. Цель работы – выработка эффективного регламента работ по контролю резьбовых участков бурильных труб с целью их оптимальной эксплуатации.

В работе были исследованы методами неразрушающего контроля 25 труб диаметром 70 мм и длиной 320 мм после длительной эксплуатации. В каждой трубе были обнаружены усталостные трещины в конце резьбовой части. Контроль проводили специалисты не ниже второго уровня квалификации с помощью поверенного оборудования по методикам, утвержденным специалистами третьего уровня по соответствующему методу.

Полученные результаты показывают, что наибольшее количество трещин позволило выявить магнитопорошковый метод полюсным намагничиванием способом приложенного поля с применением электромагнита и люминесцентного магнитного индикатора. Магнитопорошковым методом в каждой трубе идентифицированы одна и более трещин усталостного происхождения.

В 65 % проконтролированных труб идентифицированы трещины вихретоковым методом при ручном сканировании преобразователем с диаметром катушки, позволяющим устанавливать его на поверхность впадины без зазора. При этом трещины обнаружены на участках, где при контроле магнитопорошковым методом визуально зафиксированы наиболее широкие валики магнитного порошка. Разработанная методика вихретокового контроля позволила по величине сигнала определять глубину трещины. При этом установлено, что величина сигнала коррелирует с толщиной валика магнитного порошка.

В 28 % деталей наиболее развитые трещины, выявленные магнитопорошковым и вихретоковым методами, зафиксированы капиллярным методом. Такой невысокий процент выявления трещин связан с малой шириной капилляров и, возможно, заполнением их грязью.

Наиболее крупные трещины в четырех трубах, развитые в глубину, были зафиксированы и ультразвуковым эхо-импульсным методом при настройке чувствительности на выявление дефектов эквивалентной площадью от 7 мм² на заданной глубине. Величина амплитуды сигналов от развитой вглубь трещины коррелирует с величиной сигнала при вихретоковом контроле.

Таким образом, магнитопорошковый метод, в отличие от других методов, позволяет выявлять усталостные трещины на ранних стадиях развития. Однако до тех пор, пока трещины не развились вглубь до состояния, когда они выявляются ультразвуковым методом, трубы вполне пригодны для эксплуатации. Таким образом, появление трещин целесообразно фиксировать магнитопорошковым методом, а последующий рост этих трещин отслеживать ультразвуковым или вихретоковым методами. Такая последовательность контроля позволяет снизить отказы труб в ходе бурильных работ, а частота применения методов контроля зависит от интенсивности использования бурильных труб.

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРОВ КАНАЛОВ ПРИ МУНДШТУЧНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВОГО ПАРАФИНОВОГО ТЕЛА НА ПАРАМЕТРЫ ПРЕССОВКИ

Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

д. 1, ул. Metallургов, г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация,

e-mail: joyful289@inbox.ru

Формирование точных изделий с неограниченной пространственной конфигурацией, изготавливаемых из широкого диапазона литейных сплавов в настоящее время осуществляется преимущественно литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ). Технологическим этапом традиционного процесса получения отливок в ЛВМ является изготовление выплавляемых моделей (ВМ) заливкой жидкого (либо запрессовкой пастообразного) модельного материала в пресс-форму. Недостатком такого способа является появление усадочных дефектов при формировании ВМ, а также вероятность появления трещин в оболочковой форме на этапе удаления ВМ из нее. Эти проблемы решаются модернизацией технологии путем получения пористых ВМ «холодным» прессованием порошков воскообразных материалов фракций $0,63 \div 2,5$ мм. Плотность таких ВМ меньше плотности традиционных моделей на $6 \div 12$ %; они не имеют усадочных дефектов и не являются причиной появления трещин в керамической оболочке. Шероховатость их поверхности регламентируется качеством формообразующих элементов пресс-формы. Однако в результате переуплотнения порошка при прессовании возникает нарушение конечной геометрии и размеров пористой ВМ в результате упругого отклика уплотненного материала. Размеры упругого отклика значительно меньше размеров усадки и зависят от физических свойств уплотняемого материала, скорости прессования, времени выдержки прессовки под нагрузкой [1]. Проблема переуплотнения характерна для участков пористых прессованных ВМ с элементами разной толщины [2, 3]. Значение плотности переуплотненных участков, как правило, превышает плотность материала, полученную при его свободной заливке и охлаждении. Решение этой проблемы – в реализации позиционного размещения окон подачи порошкового материала в полость пресс-формы, которые призваны обеспечить равномерное распределение плотности во всех участках прессованной ВМ. Количество таких окон-диффузоров соответствует количеству участков прессовки с переменной плотностью. Цель работы – экспериментальное определение условий мундштучного выдавливания, при которых плотность прессовки ниже плотности воскообразного материала в литом состоянии.

Для реализации цели порошковые фракции парафина марки Т1 помещали в стальной цилиндр, снабженный в нижней части мундштуком, выполненным в виде конического диффузора с углом наклона образующих поверхностей 120° , и центральным отверстием. При перемещении пресс-пуансона порошковое тело уплотняется и материал выдавливается через мундштук. В ходе эксперимента диаметр диффузора мундштука изменяли по отношению к площади внутренней полости цилиндра от $1/60$ до $1/6$. Установлено, что при соотношении $1:5$ плотность прессовки на выходе из мундштука ниже, чем плотность литого материала Т1.

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН

Литература

1. Finite Element Modeling of the Stress-Strain State of Waxy Compacts / A. A. Sosnin, N. A. Bogdanova, S. G. Zhilin, and O. N. Komarov // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019) : AIP Conf. Proc. – 2019. – 2176. – P. 030017-1–030017-4.
2. Способ получения биметаллической отливки : пат. 2696118 Рос. Федерация / Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н. – № 2018140932 ; заявл. 21.11.2018 ; опубл. 31.07.2019, Бюл. № 22.

НАНОИНДЕНТАЦИЯ НЕОДНОРОДНОГО СЕТОЧНОГО УГЛЕРОД-СОДЕРЖАЩЕГО НАНОПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ УПРУГОГО ПОЛИУРЕТАНА

Морозов И. А.¹, Беляев А. Ю.¹, Каменецких А. С.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН,
1, ул. ак. Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: ilya.morozov@gmail.com

²Институт электрофизики УрО РАН,
д. 106, ул. Амундсена, г. Екатеринбург, 620016, Российская Федерация

Плазменная обработка упругих эластомеров представляет интерес при создании изделий с улучшенными биомедицинскими свойствами. Большого внимания требуют механические свойства покрытий. Даже относительно малые деформации полимерной подложки способны существенно повредить жесткую модифицированную поверхность [1], а при реальных условиях эксплуатации следует ожидать и негативного влияния на контактирующую с данной поверхностью внешнюю среду, например ткани живого организма. В связи с этим требуется, во-первых, подбор щадящих режимов обработки, во-вторых, – исследование механических свойств получаемых поверхностей. Одним из способов создания покрытий с требуемыми свойствами является плазмохимическое осаждение ионов из газовой фазы. Использование, например, ацетилена позволяет получать углеродное покрытие, структура которого на начальном этапе формирования имеет вид разрывной пленки [2].

Полиуретан – двухфазный полимер (блоки жесткой фазы неоднородно расположены в матрице мягкой фазы), широко используемый при создании биомедицинских изделий (имплантаты, трубки и др.). В работе для обработки упругого полиуретана (модуль упругости 25 МПа) использовали плазменное разложение смеси ацетилена и азота. На начальном этапе обработки на поверхности формируется неоднородное углеродсодержащее (по результатам спектроскопии комбинационного рассеяния) сеточное нанопокрывтие. Неоднородность покрытий обусловлена как исходной подложкой, так и режимом обработки.

Структурно-механические свойства покрытия определяли при помощи атомно-силовой микроскопии (АСМ) и конечноэлементного моделирования (МКЭ). В результате индентации поверхности зондом АСМ происходит вдавливание покрытия в мягкую подложку с последующим прокалыванием нанесенного слоя. Измерение глубины отпечатка позволило определить толщину покрытия (от 5 до 10 нм). Сравнение начального участка индентационной кривой до прокалывания с расчетами МКЭ (вдавливание жесткого индентера в слой известной толщины на упругой подложке) позволило оценить модуль упругости покрытия (несколько ГПа). АСМ-индентирование участков поверхности позволило построить одновременно карты рельефа, толщины и модуля упругости покрытий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-79-20042.

Литература

1. The Fracture of Plasma-Treated Polyurethane Surface under Fatigue Loading / I. A. Morozov, A. S. Mamaev, M. V. Bannikov, A. Yu. Beliaev, I. V. Osorgina // *Coatings*. – 2018. – Vol. 8 (2). – P. 75–111.
2. Syntesis of Carbon Nanostructures Near Room Temperature Using Microwave PECVD / F. H. O. Carvalho, A. R. Vaz, S. Moshkalev, R. V. Gelamo // *Materials Research*. – 2015. – Vol. 18 (4). – P. 860–866.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Петров Д. С.^{а)}, Семенов А. А.^{б)}

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
4, 2-я Красноармейская ул., Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}gsm1990@mail.ru; ^{б)}sw.semenov@gmail.com*

Развитие современной промышленности ставит задачи расчета тонкостенных конструкций, сочетающих в себе легкость с высокой прочностью, что и обуславливает их широкое использование. Повышенные требования к прочности и надежности при уменьшении материалоемкости создают сложные проблемы анализа напряженно-деформированного состояния тонкостенных тел в зоне концентрации напряжений. В связи с этим одной из главных задач механики тонкостенных конструкций является совершенствование методов расчета и проектирования пластин и оболочек сложной формы. Современные программные комплексы на основе МКЭ позволяют проводить исследования таких конструкций [1–6].

Цель работы – апробация методики исследования устойчивости и напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочечной конструкции под действием различных нагрузок в программном комплексе ANSYS.

В частности, будем использовать ANSYS Mechanical APDL 19.2. В его математическом ядре запрограммирована функция расчета перемещений точек элементов конструкции с помощью метода длины дуги (arc-length method), что позволяет исследовать усилия, возникающие в конечноузловых элементах, а также перемещения узлов конечных элементов в за критической области нагружения.

Рассмотрим панели цилиндрических оболочек из стали ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$) с параметрами: длина $a = 20$ м; толщина $h = 0,01$ м; радиус $R = 5,4$ м; угол разворота $b = 90^\circ$ или $b = 180^\circ$. Закрепление контура – неподвижный шарнир в продольном направлении и свободный край вдоль окружной координаты, нагрузка – равномерно распределенная или сосредоточенная. Таким образом, получим 4 варианта цилиндрических панелей.

В качестве типа элементов, из которого будет сформирована расчетная модель, выбран тип Shell 181, что позволяет учитывать большие деформации при проведении расчетов.

Разбиение на элементы (meshing) задается со следующими параметрами: сетка регулярная (mapped), элементы имеют прямоугольную форму (quad). Каждая конструкция разделяется (divide) на 16 элементов по длине и ширине.

После проведения расчетов для оболочек при воздействии распределенной нагрузки с углами разворота $b = 90^\circ$ и $b = 180^\circ$ были получены значения критических нагрузок потери устойчивости $q_{cr} = 0,015$ МПа и $q_{cr} = 0,01$ МПа соответственно, остальные конструкции устойчивость не потеряли.

Для всех рассматриваемых вариантов конструкций были получены графики зависимости нормальных перемещений от нагрузки, значения были вычислены с учетом геометрической нелинейности. Существенная разница в критических значениях по сравнению с линейным расчетом свидетельствует о необходимости учета геометрической нелинейности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00474).

Литература

1. Цепенников М. В., Повышев И. А., Сметанников О. Ю. Верификация численной методики расчета разрушения конструкций из композиционных материалов // Вестник ПНИПУ. Прикладная математика и механика. – 2012. – № 10. – С. 225–241.

2. Trushin S., Goryachkin D. Numerical evaluation of stress-strain state of bending plates based on various models // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 153. – P. 781–784. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.242.
3. Трещев А. А., Шерешевский М. Б. Исследование НДС прямоугольной в плане оболочки положительной гауссовой кривизны из ортотропных материалов с учетом свойств разносопротивляемости // *Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура*. – 2013. – № 31–2 (50). – С. 414–421.
4. Buckling Behaviour of Cylindrical Panels / R. B. Ashok, C. V. Srinivasa, Y. J. Suresh, W. P. Prema Kumar // *Nonlinear Engineering*. – 2015. – Vol. 4 (2). – P. 67–76.
5. Design optimization of stiffened storage tank for spacecraft/ B. Chen, G. Liu, J. Kang, Y. Li // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2008. – Vol. 36 (1). – P. 83–92. – DOI: 10.1007/s00158-007-0174-7.
6. Włachut J. Buckling of externally pressurized steel toriconical shells // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2016. – Vol. 144. – P. 25–34.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

Сильвестров С. А.¹, Кантемиров И. Ф.², Гумеров А. К.²

¹ООО «Астрапроект»,

д. 102 А, пр. Ямашева, г. Казань, 420133, Российская Федерация,

e-mail: silvestrovs@mail.ru

²ФБГОУ «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

д. 1, ул. Космонавтов, г. Уфа, 450062, Российская Федерация,

e-mail: ikant@mail.ru

Обзор научной и нормативной литературы в области прочности и диагностики, а также анализ аварийных ситуаций и происходящих разрушений на различных трубопроводах указывает на ряд нерешенных методических вопросов, непосредственно влияющих на надежность длительно эксплуатируемых нефтегазопроводов.

При оценке степени опасности обнаруженных дефектов динамика изменения механических свойств металла труб при длительной эксплуатации не учитывается. Кроме того, практически не учитывается разброс свойств металла по участкам (на бездефектных участках, в окрестности дефектов, в зоне сварных соединений). Это является источником погрешности при оценке прочности и остаточного ресурса, и, как следствие, приводит к неточному определению объемов ремонта трубопроводов.

Следующий недостаток в том, что обычно напряжения определяются по формулам, которые справедливы для прямолинейных участков, проложенных в прямых траншеях. Появление напряжений изгиба на участках со сложным рельефом местности приводит к тому, что в одном и том же сечении трубы напряжения будут разными на разных образующих. Следовательно, одинаковый дефект, расположенный в разных местах одного и того же сечения, будет представлять опасность разной степени.

Цель работы – совершенствовать методику исследования надежности длительно эксплуатируемых нефтегазопроводов. Выбраны следующие задачи.

1. Разработка математической модели трубопровода с учетом комплекса особенностей, включая конфигурацию трубопровода (распределение кривизны в исходном состоянии и в процессе эксплуатации), особенности рельефа местности, грунтовые изменения, температурно-силовые условия, диапазон режимов эксплуатации.

2. Изучение механизмов и закономерностей изменения механических свойств металла трубопроводов при длительной эксплуатации.

На основе результатов исследований разработаны математическая модель и программный комплекс для расчета фактического напряженного состояния нефтегазопроводов с учетом комплекса факторов. Усовершенствованы физические модели деформационного старения и стресс-коррозии, предложены методы контроля этих процессов. Разработанный инструментарий позволяет более точно определять опасность обнаруженных дефектов, назначать необходимые объемы ремонта, прогнозировать дальнейшее развитие процессов для обеспечения необходимого уровня надежности.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПО МЕТОДУ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Струнгарь Е. М.¹, Лобанов Д. С.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Центр экспериментальной механики,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: cem.spaskova@mail.ru

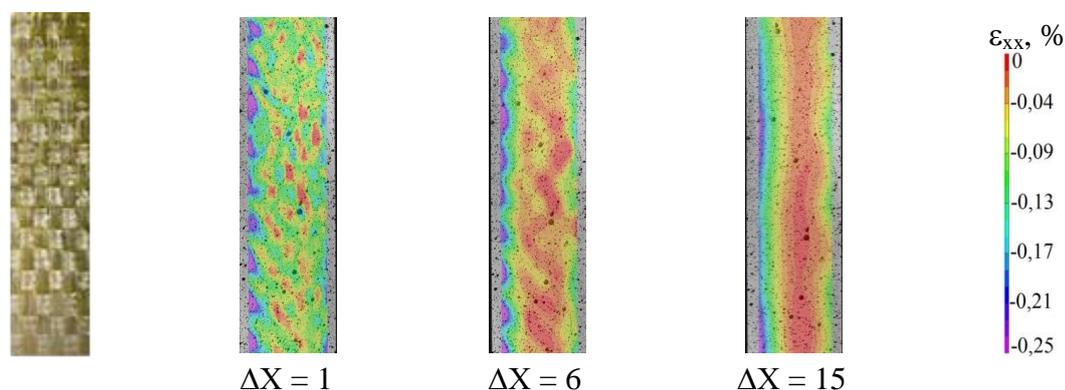
²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Центр экспериментальной механики,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: cem.lobanov@gmail.com

В работе проведен анализ численных алгоритмов обработки экспериментальных данных при использовании бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и метода корреляции цифровых изображений. Предложены рекомендации по выбору параметров расчета при анализе неоднородных полей перемещений и деформаций в композитных изделиях на примере слоистого армированного стеклопластика [1–3].

С целью оценки влияния параметров корреляционной обработки на неоднородные поля перемещений и деформаций была проведена серия построения полей для одного кадра на поверхности слоистого армированного стеклопластика при различных значениях подобласти (subset) в интервале $X = 39 \div 63$ пикселей и при фиксированном значении шага (step) $\Delta X = 3$ пикселя. Размер подобласти является допустимым, если среднее значение корреляции изображений не превышает $\sigma \leq 0,01$.

В результате исследований получены неоднородные поля поперечных деформаций при фиксированном размере подобласти $X = 53$ и различной величине шага $\Delta X = 1 \div 15$ (рисунки). В результате вычислений отмечено, что выбранный размер подобласти 53×53 обладает достаточной уникальностью распределения пикселей для возможности осуществления однозначной идентификации локальных областей по изображению.

По результатам проведенных исследований отмечено, что подбор параметров корреляционной обработки должен осуществляться с учетом размера структурной неоднородности материала. С целью оценки структурных особенностей материала, для изучения процессов возникновения и развития дефектных структур и разрушения, анализа поведения в зонах концентрации напряжений необходимо устанавливать величину шага, сопоставимую с размером структурной неоднородности.



Поля поперечных деформаций при фиксированном размере подобласти и различной величине шага

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых МК-1222.2020.8.

Литература

1. Deformation and failure of carbon fiber composite specimens with embedded defects during tension-torsion test / V. E. Wildemann, T. V. Tretyakova, E. M. Strungar, M. P. Tretyakov // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2018. – Vol. 12 (46). – P. 295–305.
2. Wildemann V. E., Spaskova E. V., Shilova A. I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation problems of deformation and fracture in materials and structures // *Solid State Phenomena*. – 2016. – Vol. 243. – P. 163–170.
3. Studying the Development of a Technological Defect in Complex Stressed Construction CFRP Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission Methods / D. S. Lobanov, E. M. Strungar, E. M. Zubova, V. E. Wildemann // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2019. – Vol. 55 (9). – P. 631–638.

НОВАЯ УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С НЕНОРМАТИВНОЙ КРИВИЗНОЙ

Сильвестров С. А.¹, Бережной Д. В.², Гумеров А. К.³

¹ООО «Астрапроект»,

д. 102 А, пр. Ямашева, г. Казань, 420133, Российская Федерация,
e-mail: silvestrovs@mail.ru

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,

д. 18, Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,
e-mail: berezhnoi.dmitri@mail.ru

³ФБГОУ «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

д. 1, ул. Космонавтов, г. Уфа, 450062, Российская Федерация,
e-mail: ikant@mail.ru

В последние годы существенно повысились требования к точности расчетных оценок напряженно-деформированного состояния трубопроводов, особенно в сложных природно-климатических условиях и на потенциально опасных участках. Практически во всех источниках используют понятие начальной кривизны, при этом подразумевается состояние исходно прямого трубопровода, уложенного в несовершенную прямолинейную траншею как в плане, так и профиле. Фактически, от идеальной прямой отличаются и дно траншеи, и сам трубопровод перед укладкой. В итоге трубопровод после засыпки оказывается с некоторым искривлением, что приводит в дальнейшем к расчету преднапряженной конструкции. Поэтому для моделирования процессов деформирования трубопровода необходимо скорректировать систему разрешающих уравнений таким образом, чтобы учесть начальную конфигурацию трубы, неоднородность по исходной кривизне, а также все действующие силы как со стороны продукта перекачки, так и со стороны окружающего грунта. Работоспособная и адекватная численная модель расчета трубопровода, взаимодействующего с грунтом в процессе его укладки и дальнейшей эксплуатации, может быть реализована в программных комплексах численного моделирования: ANSYS, Nastran, ABAQUS, Midas, Лира и др. Однако подобные расчеты очень трудоемки.

В качестве иллюстрации работоспособности предложенного алгоритма решена задача заглубленного в грунтовую среду трубопровода высокого давления. Поверхность грунта, по которой проложен трубопровод имеет ступеньку, за счет чего трубопровод естественным образом изгибается в вертикальной плоскости. Определено изогнутое положение оси взаимодействующего с грунтом трубопровода, вычислены возникающие в трубе напряжения. Исследовано изменение напряженно-деформированного состояния в трубопроводе после врезки вместо максимально нагруженных участков трубопровода в зоне его перегиба ненапряженных отводов, определены их оптимальные размеры. Для оценки точности предложенной методики задача также была решена в программном комплексе ANSYS с использованием специально конечного элемента для расчета трубопроводов типа PIPE. Результаты, полученные в программном комплексе ANSYS, практически совпадают с результатами, полученными по предложенной методике. Сравнение результатов решения задачи, полученных на основе новой уточненной системы разрешающих уравнений при сравнительно небольших затратах ресурсов ЭВМ, с результатами, полученными в программном комплексе ANSYS, показало высокую эффективность предложенной методики.

КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛА (001) НИОБИЯ ПРИ БОЛЬШОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Дегтярев М. В.^{1,2}, Воронова Л. М.¹, Чашухина Т. И.^{1,2}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: e-mail: highpress@imp.uran.ru

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

Ниобий высокой чистоты применяется для изготовления сверхпроводящих радиочастотных резонаторов в линейных ускорителях. Максимальные характеристики резонаторов требуют гладкой поверхности, достигаемой электролитической полировкой. При такой обработке появляется шероховатость поверхности изделия вследствие различной скорости полируемости зерен с разной ориентировкой. Цель работы – создание в ниобии однородно ориентированной (текстурированной) зеренной структуры, не склонной к образованию дефектов при заключительной электрополировке.

Монокристаллический ниобий (плоскости {001} были параллельны плоскости образца) деформировали методом сдвиг под давлением (6 ГПа) при комнатной температуре (300 К) и температуре кипения жидкого азота (80 К), с углом поворота наковальни от 15° до 10 об. наковальни, а также сжатием, без порота наковальни. Образцы, деформированные на 5 об., отжигали в течение 2 ч при температурах 473–1373 К. Рассчитывали истинную деформацию (ϵ) с учетом угла поворота наковальни, толщины образца и расстояния от оси вращения. Твердость ниобия измеряли по радиусу образцов, структуру исследовали методом просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии на расстоянии 1–1,5 мм от центра образца. Рентгеноструктурный анализ деформированных образцов проводили в $\text{Co } K_{\alpha}$ -излучении при съемке на отражение. Ориентировку рекристаллизованных зерен оценивали на основании анализа дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD).

В результате деформации исходная монокристаллическая ориентировка разрушается с образованием при 300 К после $\epsilon > 4$ поликристаллического бестекстурного состояния, а при 80 К и $\epsilon > 0,5$ – поликристалла со слабой аксиальной текстурой {310}. При деформации $\epsilon > 4$ при обеих температурах зафиксирована стадия субмикроструктурной (СМК) структуры, характеризующаяся низкими коэффициентами повышения твердости и измельчения структуры. При 300 К такое поведение обусловлено развитием динамического возврата, несмотря на низкую гомологическую температуру деформации (0,11 $T_{пл}$). Деформация Nb при 80 К не приводит к развитию деформационного двойникования, в отличие от металлов со средней ЭДУ, но вызывает образование слаборазориентированных полосовых структур. Средний размер микрокристаллита после деформации при 300 и 80 К составил 120 и 40 нм соответственно. Наблюдаемое на стадии СМК-структуры слабое упрочнение и измельчение тем не менее является значимым, что было выявлено при последующих отжигах.

Увеличение истинной деформации при 300 К привело к замедлению разупрочнения и уменьшению размера рекристаллизованного зерна. После криогенной деформации при низкой температуре отжига в нерекристаллизованной матрице восстанавливается ориентировка исходного монокристалла {001}. После высокого отжига (973 К) текстура рекристаллизации ниобия меняется по радиусу образца, в центре сохраняется ориентировка исходного монокристалла, а на периферии формируется текстура {110}. Таким образом, криогенная деформация ниобия проходила неоднородно, и в отдельных областях ее величина сильно отличалась от средней расчетной. Установлен режим отжига СМК Nb, позволяющий получить структуру со средним размером зерна 10 мкм, характеризующуюся аксиальной текстурой рекристаллизации {110}.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» при поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект № 18-10-2-24) и РФФИ (проект № 15-03-00909).

ТВЕРДОСТЬ И СТРУКТУРА БРОНЕВОЙ СТАЛИ УРАЛМАШЕВСКИХ САМОХОДНЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ УСТАНОВОК СУ-85 и СУ-100

Гижевский Б. А.¹, Дегтярев М. В.¹, Чашухина Т. И.¹, Воронова Л. М.¹, Патраков Е. И.¹, Наумов С. В.¹, Мельников Н. Н.², Рузаев С. В.³, Запарий Вас. В.², Запарий Вл. В.⁴

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

²Институт истории и археологии УрО РАН

³Частное учреждение культуры «Музейный комплекс»

⁴Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

В литературе, посвященной Великой Отечественной Войне (ВОВ), в частности характеристикам бронетехники, почти отсутствуют исследования качества применяемых броневых сталей. Такого рода работы помимо получения конкретных металлургических данных необходимы для понимания путей развития броневого производства, подходов советских металлургов к созданию оптимальных броневых сталей в годы ВОВ. Нами исследованы состав, металлографические и фрактографические характеристики образцов брони САУ СУ-85 и СУ-100, произведенных УЗТМ в 1943–1945 гг. и в настоящее время представленных в экспозиции Музея военной техники УГМК. Химический состав и твердость определяли неразрушающим методом непосредственно на экспонатах музея с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра X-Met 7500. Исследования структуры и поверхности изломов сталей проводили на электронном микроскопе Inspect F с EDX-спектрометром. Рентгенофазовый анализ выполнен на приборе ДРОН 3 в излучении Cr K_α. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1 Н.

Образцы для исследования отбирали от бортового листа СУ-85 (*образец 1*) и лобового СУ-100 (*образец 2*). Малые размеры отобранных образцов, обусловленные требованием минимальных повреждений музейных экспонатов, определили специфику проводимых исследований. По составу основных легирующих элементов (Cr, Mn, Ni, Mo) броня СУ-85 соответствует броневой стали 8С, используемой для танков Т-34. Лобовая броня СУ-100 содержит повышенную в 2 раза концентрацию Cr и пониженное содержание Ni, Mo, Si. Сталь *образца 1* имеет структуру отпущенного пакетного мартенсита, размер пакета 20–30 мкм, содержание остаточного аустенита 5 %. Структура стали *образца 2* представляет отпущенный бейнит и также содержит 5 % остаточного аустенита. Твердость стали *образца 1* составляет 3500 МПа, а *образца 2* – 2280 МПа. На шлифах выявлены в довольно большом количестве поры округлой или вытянутой формы размером 5–30 мкм и трещины длиной до 30 мкм.

Одно из основных требований к броне заключается в достижении такого сочетания твердости и вязкости, чтобы она выдерживала обстрел и при попадании снаряда без пробития не давала расслоений и отколов. Эти качества могут быть оценены при изучении вида излома. Результаты показывают, что изломы носят преимущественно вязкий транскристаллитный характер. Межзеренное разрушение не наблюдается. На поверхности изломов наблюдается большое количество сульфидных выделений, что является следствием повышенного содержания серы. Присутствует также заметное количество шлаковых включений. Как известно, создание танковой промышленности на востоке страны проходило в тяжелейших условиях военного времени, поэтому не всегда удавалось выдерживать в полном объеме необходимые требования к броневой защите средних танков и САУ на их основе.

Работа выполнена в рамках программ «Спин», «Давление» при частичной поддержке проекта РФФИ № 19-09-0005А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНООБЪЕКТОВ

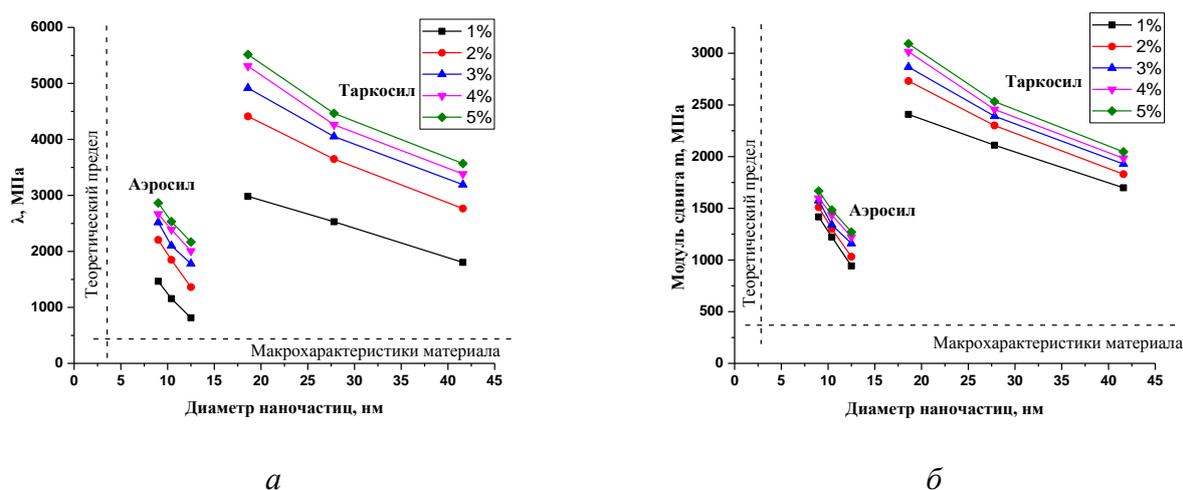
Филиппов А. А.¹, Фомин В. М.^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет,
1, ул. Пирогова, Новосибирск, 630090, Российская Федерация,
e-mail: fomin@itam.nsc.ru

С уменьшением структурных объектов материала, на которых изучаются их механические и физические свойства, требуется введение новых моделей для успешного описания поведения этих материалов на различных мезоуровнях. В представленных работах показано, что при изменении характерного размера наноматериалов их характеристики могут изменяться на порядки [1, 2]. Практические методы определения механических характеристик наноматериалов представляют технически сложную задачу и в полной мере нереализуемую из-за размеров нанобъектов и сопутствующих трудностей [3]. Расчетные модели дают достаточно большие расхождения в связи с неточными заложенными в них исходными начальными данными [4].

В представленной работе на основе теоретико-экспериментального подхода удастся получить упругие модули наноструктур в зависимости от размеров и структуры их образования. Гетерогенный материал, состоящий из наночастиц как наполнителя и связующего, массовые и объемные концентрации которых заданы, с помощью методов осреднения сводится к гомогенному. Такой подход связывает механические характеристики фаз через эффективные свойства [5]. Полученный гомогенный материал позволяет получать образцы для классических экспериментов на растяжение, сжатие, кручение и др. При этом в осредненные механические характеристики материала будут входить механические характеристики составляющих фаз. Принимая упругие свойства связующего материала и осредненные характеристики гомогенного материала известными из данных экспериментов, получим систему уравнений для определения механических характеристик наночастиц, входящих в данный гомогенный образец. Изменяя размеры наночастиц и, проводя соответствующие расчеты и эксперименты, получим закономерность изменения механических характеристик для наночастицы (рисунок).



Параметры Ламэ, рассчитанные для наночастиц диоксида кремния в зависимости от среднего размера при различных объемных концентрациях наполнителя: *а* – параметр λ ; *б* – модуль сдвига

Используя предложенный подход, были исследованы упругие характеристики наночастиц диоксида кремния порошков Аэросил и Таркосил в зависимости от диаметров. В результате осреднения по объему и в приближении одноосного напряженного и деформированного состояния удастся получить систему алгебраических уравнений, связывающих

$$\lambda_1 = \varphi_1(\lambda_2, \mu_2, \hat{\lambda}, \hat{\mu}, m_1, d_1); \quad \mu_1 = \varphi_1(\lambda_2, \mu_2, \hat{\lambda}, \hat{\mu}, m_1, d_1),$$

где λ_1, μ_1 - константы Ламэ для нанофазы; $\lambda_2, \mu_2, \hat{\lambda}, \hat{\mu}$ - константы Ламэ связующей и осредненной фаз соответственно; m_1 - объемная концентрация и d_1 - диаметр нанофазы. Проведя эксперименты на растяжение и сжатие в одноосном напряженном приближении, находим $\hat{\lambda}, \hat{\mu}$ при заданных m_1, d_1 , чем и замыкается система. Подготовка полимерного композиционного материала подробно описана в [6], а результаты механических испытаний изложены также в работе [7].

В результате приведенных исследований установлено, что при увеличении d_1 параметры λ_1, μ_1 асимптотически стремятся к классическому сплошному материалу, а при уменьшении d_1 параметры λ_1, μ_1 возрастают, стремясь к теоретическому пределу, вычисленному в приближении двухатомной структуры. Следует заметить, что данные результаты подтверждают выводы Н.Ф. Морозова, А.М. Кривцова и др., полученные на основе теоретических исследований [8, 9].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-31-00135_мол_а.

Литература

1. Moczko J., Pukanszky B. Polymer Micro and Nanocomposites: Structure, Interactions, Properties // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2008. – № 14. – P. 535–563.
2. Ni Q.-Q., Fu Y., Iwamoto M. Evaluation of Elastic Modulus of Nano Particles in PMMA/Silica Nanocomposites // Journal of the Society of Material Science. – 2004. Vol. 53 (9). – P. 956–961.
3. Size effects on the fracture of microscale and nanoscale materials / A. Taloni, M. Vodret, G. Costantini, S. Zapperi // Nature Reviews: Materials. – 2018. – No. 3. – P. 211–224.
4. Theoretical bases of modeling of nanostructures formed from the gas phase / A. V. Vakhrushev, A. Y. Fedotov, A. A. Vakhrushev, V. B. Golubchikov // Journal of Mathematics and Computations in Simulation. – 2016. – Vol. 10. – P. 192–201.
5. Elastic Properties and Structure of Interpenetrating Boron Carbide/Aluminum Multiphase Composites / S. Torquato, C. L. Y. Yeong, M. D. Rintoul, D. L. Milius, I. A. Aksay // Journal of American Ceramic Society. – 1999. – No. 82 (5). – P. 1263–1268.
6. Influence of the nanosized filler nature on the mechanical properties of epoxy-anhydride polymer composites / T. A. Brusentseva, A. A. Filippov, V. M. Fomin, E. V. Malykhin, T. A. Vaganova // Nanotechnologies in Russia. – 2014. – Vol. 9 (11–12). – P. 638–644. DOI: 10.1134/S1995078014060068.
7. Modification of Epoxy Resin with Silica Nanoparticles and Process Engineering of Composites Based on Them / T. A. Brusentseva, A. A. Filippov, V. M. Fomin, S.V. Smirnov, I. A. Veretennikova // Mechanics of Composite Materials. – 2015. – Vol. 51 (4). – P. 531–538.
8. Еремеев В. А., Иванова Е. А., Морозов Н. Ф. Механические проблемы в нанотехнологии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика. – 2008. – № 3 (8). – С. 25–32.
9. Lattice with vacancies: elastic fields and effective properties in frameworks of discrete and continuum models / V. A. Kuzkin, A. M. Krivtsov, E. A. Podolskaya, M. L. Kachanov // Philosophical Magazine. – 2016. – Vol. 96 (15). – P. 1538–1555.

РЕДУЦИРОВАННЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ЭВОЛЮЦИИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Остапович К. В.^{1, а)}, Трусов П. В.^{2, б)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}ostkirvad@gmail.com, ^{б)}tpv@matmod.pstu.ac.ru*

В последние десятилетия все большую актуальность приобретают проблемы, связанные с получением функциональных поликристаллических материалов для изготовления деталей и конструкций с оптимальными эксплуатационными характеристиками. Поскольку эффективные свойства материалов определяются внутренним строением, представляет интерес исследование технологических процессов, вызывающих изменение их структуры на различных уровнях. Значительный класс таких процессов включает всевозможные методы термомеханической обработки, основанные на интенсивном неупругом деформировании. Рациональное варьирование режимов реализации этих методов позволяет управлять внутренней структурой материалов на мезо- и микро- масштабах и, таким образом, дает возможность создания требуемых распределений физико-механических характеристик, влияющих на рабочие параметры создаваемых изделий.

В общем случае установление оптимальных режимов обработки, формирующих необходимые свойства в поликристаллических заготовках, требует решения связанных обратных контактных задач с нелинейными многоуровневыми определяющими соотношениями. В связи с тем, что подобные задачи, как правило, являются крайне ресурсоемкими, представляется целесообразной разработка редуцированных моделей и соответствующих им вычислительных реализаций, эффективно описывающих состояние внутренней структуры обрабатываемых материалов. В настоящей работе предлагается подход, основанный на модификации расчетной схемы статистической модели [1] поликристалла за счет включения процедуры кластеризации переменных мезоуровня [2].

Кластеризация осуществляется на промежуточных временных итерациях исследуемого процесса для каждого поликристаллического агрегата, моделирующего материальную точку. В результате ее проведения кристаллиты, близкие между собой по состоянию внутренней структуры, объединяются в кластеры, характеризующиеся мощностью и эффективными свойствами, учитываемыми при статистическом осреднении. Редуцирование достигается за счет того, что дальнейшая эволюция кластеров описывается в терминах изменения только указанных свойств, так что каждый кластер формально трактуется как кристаллит со значительной объемной долей решетки. Близость структурных состояний кристаллитов определяется последовательным сравнением вначале их ориентаций, а затем параметров, по отношению к которым спин мезоуровня оказывается наиболее чувствительным. При сопоставлении ориентаций принимается во внимание геометрическая симметрия кристаллической решетки; данный вопрос решается введением специального псевдометрического расстояния, порожденного естественной римановой метрикой на собственно ортогональной группе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект № 0751-2020-0027) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-41-590694-р_а).

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. Остапович К. В., Трусов П. В. Исследование кристаллографических текстур при многоуровневом моделировании деформирования поликристаллов с помощью методов кластерного анализа // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12 (1). – С. 67–79.

РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Шишин Н. Н.¹, Савицкий П. А.¹, Калинин С. В.¹, Бабайлов Н. А.²

¹Уральский федеральный университет, филиал УрФУ в г. Верхняя Салда,
1, Рабочей Молодежи, 624600, Верхняя Салда, Российская Федерация,
e-mail: fupi_vs@e1.ru

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

Цель работы – разработка программного обеспечения для анализа энергосиловых параметров при пластической деформации в технологических процессах обработки металлов давлением (ОМД), например, при прямом и обратном прессовании, листовой прокатке, многопроходном волочении проволоки, кузнечной протяжки прутков и пр. В работе выполнена разработка интерактивных программных модулей. В этих модулях рассчитываются режимы деформации и определяются энергосиловые параметры указанных выше процессов ОМД, в том числе сила, работа и мощность пластической деформации. Разработанные программы предназначены для исследования деформации заготовок из цветных металлов и сплавов, в том числе алюминиевых, медных и титановых сплавов.

В качестве практических приложений разработанной интерактивной программы выполнены следующие технологические и прочностные расчеты в процессах обработки металлов давлением.

- Определена средняя по сечению деформируемой заготовки температура при прессовании металлоизделий, в том числе труб и прутков [1, 2]. Расчет выполнен на основе практических данных, полученных на промышленных предприятиях. В частности были пересчитаны так называемые «индикаторные диаграммы» работы горизонтального гидравлического пресса – зависимость силы прессования от хода прессштемполя (для алюминиевых труб из сплава АД-31 и титановых прутков из сплава ВТ-6).

- Выполнена оценка режимов волочения композиционной проволоки при многопроходном волочении из биметаллической заготовки [3].

Пользователи программных модулей имеют возможность осуществить качественный и количественный анализ исследуемых процессов с целью обеспечения режимов энергосбережения, а также эффективности работы оборудования ОМД.

Программные модули имеют удобный интерфейс для работы пользователей. Они позволяют выполнять технологически обоснованный подбор размеров заготовок перед деформацией, подбор температурно-скоростных условий деформации, а также выполнить расчет на прочность основных элементов оборудования и инструмента.

Работа выполнена на кафедре «Металлургия титана» при выполнении курсовых научно-исследовательских работ (НИР) в филиале Уральского федерального университета в г. Верхняя Салда.

Работа выполнена при поддержке ГРАНТА РФФИ № 19-08-00765_А.

Литература

1. Шишин Н. Н., Бабайлов Н. А. Интерактивный калькулятор для расчета энергосиловых параметров прессования // Сборник материалов XI международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург, 2017. – С. 73.
2. Шишин Н. Н., Бабайлов Н. А. Изменение температуры заготовки при прессовании // «Актуальные проблемы развития технических наук» // Сборник статей участников XX Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп». – М. : Эдитус, 2018. – С. 48–53.

3. Шишин Н. Н., Бабайлов Н. А. Программа расчета параметров многопроходного волочения проволоки // Сборник материалов XII международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург, 2018. – С. 26.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННОЙ ПОКОВКИ В УСТРОЙСТВЕ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

д. 1, ул. Metallургов, г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация,

e-mail: sosnin@imim.ru

Неотъемлемой частью производственного процесса является математическое моделирование технологических процессов, позволяющее значительно упростить и уменьшить объем экспериментальных исследований, необходимых для опытно-конструкторских работ. При получении металлоизделий с применением устройства литья и деформации металла (УЛДМ) реализуется совмещенный металлургический процесс, при котором в подвижном составном кристаллизаторе материал металлоизделия одновременно кристаллизуется и деформируется [1]. При этом решается часть недостатков литейно-прокатных модулей, таких как требование больших производственных площадей для размещения оборудования, ветвей конвейера для накопления заготовок, дополнительных печей для поддержания их температуры. Известно, что для реализации устойчивого процесса получения металлоизделий на УЛДМ определяющее значение имеет четкое соблюдение температурных режимов. Для этого необходимо установить, какие из температурных режимов будут обеспечивать технологический процесс, при котором получаемое металлоизделие будет формироваться в наиболее благоприятных условиях. В связи с этим необходимо определить напряжения, возникающие в формовке, с помощью математической модели [2] произвести их расчет, убедиться, что значения расчетных напряжений не превышают механическую прочность формовки [3], а значит, изделие не будет разрушаться или повреждаться в процессе ее получения.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить ряд задач: провести физический эксперимент, позволяющий установить распределение температур в кристаллизаторе УЛДМ; полученное поле температур использовать для уточнения граничных условий математической модели процесса формирования изделия на УЛДМ; произвести расчет напряжений, при которых формируется изделие; провести физический эксперимент по уточненной модели получения изделия.

В ходе работы установлено, что выбранное распределение температур в начальной математической модели не соответствует действительности. В ходе вычислений, математическая модель продуцирует заниженные значения нормальных напряжений в формовке. При экспериментальном уточнении граничных условий получены более высокие значения напряжений. Учитывая, что предел прочности технического алюминия марки АД0 при температуре 300 °С составляет 90 МПа, рассчитанные напряжения не превышают предел прочности материала. Таким образом, получаемое металлоизделие не будет разрушаться при изготовлении.

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

Литература

1. Модернизация установки литья и деформации металла: формирование бездефектной протяженной алюминиевой / А. А. Соснин, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, Н. А. Богданова // Вестник Инженерной школы ДВФУ, о. Русский, кампус ДВФУ. – 2019. – № 4. – С. 29–38.
2. Комплексное моделирование тепловых и деформационных процессов, протекающих в кристаллизаторе установки литья и деформации металла при получении металлоизделий : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012613947 /

Одинокое В. И., Соснин А. А., Саликов С. Р. – № 2012610027 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 27.04.2012. Реестр программ для ЭВМ.

3. Черномас В. В., Ловизин Н. С., Соснин А. А. Критерии устойчивости технологического процесса получения металлоизделий на установке горизонтального литья и деформации металла // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2012. – № 2. – С. 71–77.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ИСТОЧНИКОМ

Казачков А. Л.¹, Спевак Л. Ф.², Нефедова О. А.²

¹ИДСТУ СО РАН, 134, ул. Матросова, Иркутск, 664033, Российская Федерация,
e-mail: kazakov@icc.ru

²ИМАШ УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620034, Российская Федерация,
e-mail: lfs@imach.uran.ru, nefedova@imach.uran.ru

Доклад посвящен численному исследованию вырождающегося нелинейного дифференциального уравнения параболического типа с источником, зависящим от искомой функции [1]:

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

где $\varphi(u)$ – заданная функция источника, такая что $\varphi(0) = 0$.

Рассмотрен процесс распространения тепла на плоскости при заданном законе движения фронта тепловой волны:

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

Краевая задача вида (1) и (2) в отсутствие источника была впервые сформулирована в работах А.Ф. Сидорова [2].

При выполнении условия (2) справедливо следующее соотношение для теплового потока вдоль нулевого фронта:

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

Соотношение (3) позволяет свести решение задачи (1) и (2) на заданном промежутке времени к решению краевой задачи для уравнения Пуассона в узловые моменты времени с выбранным шагом. Для решения задачи для уравнения Пуассона был разработан итерационный алгоритм на основе метода граничных элементов с применением метода двойственной взаимности.

Для верификации разработанного алгоритма использовались решения тестовых задач в виде специальных степенных рядов, а также точные решения, построенные на основе автомодельного подхода. Рассмотренные примеры показали эффективность предложенного подхода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00407.

Литература

1. Vazquez J. L. The Porous Medium Equation: Mathematical Theory. – Publ. Clarendon Press, 2007. – 648 p.
2. Сидоров А. Ф. Избранные труды: Математика. Механика. – М. : Изд-во Физматлит, 2001. – 576 с.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ МЕДИ ОТ ДЕФОРМАЦИИ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

Соловей В. Д., Мушников А. Н.

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

В работе [1] приводятся диаграммы деформации для осадки технически чистой меди в большом диапазоне скоростей деформаций: $\xi = 0,002; 0,016; 150,0; 2000,0; 13300,0 \text{ c}^{-1}$ (ξ – нормальная скорость деформации в направлении сжатия образца). Следует отметить, что в этой работе нет данных о жесткости испытательных машин, поэтому кривые упрочнения для указанных скоростей деформаций не могут быть построены из диаграмм деформации стандартными методами. На основании полученных экспериментальных данных в работе найдена аналитическая зависимость сопротивления деформации технически чистой меди от скорости деформации

$$\lg(\sigma/\sigma_0) = n(e) \lg(\xi/\xi_0),$$

где σ и σ_0 – сопротивления деформации при скоростях деформации ξ и ξ_0 соответственно; $n(e)$ – показатель, зависящий от деформации e . В работе [2] приводится кривая упрочнения для квазистатической осадки технически чистой меди.

В настоящей работе на основании анализа характера диаграмм деформации для различных скоростей деформаций, приведенных в [1], и кривой упрочнения, рассмотренной в [2], за кривую упрочнения для скорости деформации $\xi = 0,002 \text{ c}^{-1}$ приближенно принимается кривая упрочнения из [2]. Кривые упрочнения для скоростей деформаций $\xi = 0,016; 150,0; 2000,0; 13300,0 \text{ c}^{-1}$ определяются с использованием соотношения аналитической зависимости, где напряжения σ_0 и скорости деформации ξ_0 относятся к кривой упрочнения для скорости деформации $\xi = 0,002 \text{ c}^{-1}$. Кривые упрочнения аппроксимированы с помощью метода, использованного в работе [3]. В результате получено аналитическое выражение, определяющее зависимость предела текучести технически чистой меди от деформации (в области $0,00 \leq 0,5$) и от скорости деформации (в области $0,002\text{--}13300,0 \text{ c}^{-1}$).

Полученное выражение может быть использовано при расчетах параметров технологических процессов обработки давлением технически чистой меди в рассмотренных диапазонах для деформации и скорости деформации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-08-00392-А.

Литература

1. Дьяков А. П., Ишуткин С. И., Соколов Л. Д. Скоростная зависимость прочностных характеристик некоторых металлов // *Обработка металлов давлением* : сборник. – 1973. – Вып. 1. – С. 28–32.
2. Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением : справочник. – М : *Металлургия*, 1973. – 224 с.
3. V.D., Loginov Y. N., Puzanov M. P. Evaluating the Flow Stress of Electrical Steel under Cold Rolling in Terms of the Strain-Rate Hardening Effect // *AIP Conf. Proc.* – 2016. – 1785. – 040075. – DOI: 10.1063/1.4967132.

ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ ОКСИДНОГО СЛОЯ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ

Жилин С. Г., Комаров О. Н., Богданова Н. А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
д. 1, ул. Металлургов, г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация,
e-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru*

К ряду причин бездеформационного разрушения паропроводов, составляющих пароперегревателей, газовых турбин и коллекторов с высоким давлением, выполненных из теплоустойчивых конструкционных сталей класса марок 12Х1МФ и 12Х18Н12Т, относят коррозию внутренней рабочей поверхности трубы [1]. Такое разрушение, преимущественно появляющееся в результате температурных колебаний, вызвано изменением структуры металла. Срок службы металла таких конструкций во многом зависит от корректного режима их эксплуатации, определяющего формирование оксидного слоя, возникающего при температурах более 230 °С на внутренних поверхностях труб. Защитная функция такого слоя состоит в предохранении основного металла трубы от коррозионных хрупких повреждений, а также в снижении напряжений, возникающих при тепловых ударах [2]. Таким образом, точная диагностика деформационной способности оксидного слоя представляется актуальной задачей. Традиционно оценку деформационной способности оксидного слоя производят, применяя методы разрушающего контроля [3], позволяющие наблюдать стадии повреждения слоя. Для этого из трубы вырезают 2–3 образца (без повреждения внутренней поверхности), которые, предварительно установив между сжимающих поверхностей тестовой машины фаской, обращенной в сторону наблюдателя, подвергают испытанию на сплющивание со скоростью деформирования не более 5 мм/мин. Дискретное наблюдение стадий разрушения оксидного слоя осуществляют по стадиям осыпания первых чешуек окалина, появления строчечных дефектов и полос оголенного металла. По достижении последней стадии определяют увеличение внутреннего диаметра образца. О работоспособности трубы судят по номограмме экспериментальной зависимости деформации в зоне сжатия от увеличения диаметра трубы. Недостатком такого подхода является низкая точность определения момента времени появления дефектов в оксидном слое, что в свою очередь снижает качество прогноза остаточного ресурса конструкции. Поскольку температура эксплуатации пароперегревателей достигает 420÷690 °С, то точность определения момента появления первой трещины в ходе испытания образцов, проводимом при комнатной температуре, не обеспечивается.

Таким образом, цель настоящего исследования – повышение точности диагностики повреждений оксидного слоя труб пароперегревателей в условиях близких к эксплуатационным. Реализация цели исследования достигалась в ходе следующих этапов эксперимента. Образец трубы пароперегревателя, подвергаемый испытанию на сплющивание, устанавливали на тестовую машину и нагревали до эксплуатационной температуры электроконтактами. Регистрацию сплющивания осуществляли синхронизированно с видеофиксацией внутренней поверхности образца видеокameraми до образования сплошной полосы металла свободной от оксидного слоя. По анализу видеозаписи определяли моменты осыпания первых чешуек оксидной пленки и появления первой трещины в оксидной пленке.

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН

Литература

1. Резинских В. Ф., Школьников Б. Э., Урусова Г. А. Перспективные стали для пароперегревателей котлов СКД // Теплоэнергетика. – 2000. – № 10. – С. 39–43.

2. Радин Ю. А., Конторович Т. С. Анализ влияния защитных пленок на внутренних поверхностях коллекторов и паропроводов ПГУ на их термонапряженное состояние // Теплоэнергетика. – 2018. – № 10. – С. 29–33
3. СТО7230282.27.100.005-2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. – Москва, 2008. – С. 442–444.

ВЛИЯНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТЕЛЬНОЙ СТАЛИ 20К

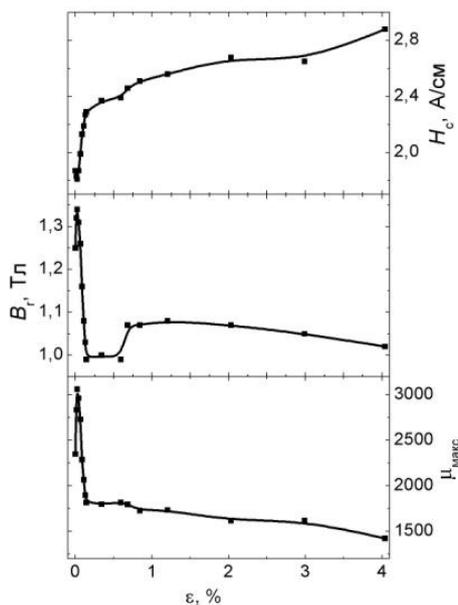
Горкунов Э. С.¹, Задворкин С. М.¹, Путилова Е. А.¹,
Мушников А. Н.¹, Мусохранов В. В.²

¹ИМАШ УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
²ВГУП «ЦАГИ», 1, ул. Жуковского, г. Жуковский, Московская область, 140180, Российская Федерация,
e-mail: tuevaevgenya@mail.ru

Анализ напряженно-деформированного состояния деталей и элементов конструкций из металлических материалов после значительного срока эксплуатации остается важной и актуальной задачей, над решением которой работают специалисты различных направлений, в том числе и по неразрушающему контролю. С точки зрения применения именно магнитных неразрушающих методов контроля исследования ведутся еще с середины прошлого столетия, в том числе и по влиянию упруго- и упругопластического деформирования на поведение магнитных характеристик. Однако каждый конкретный случай, в особенности если это касается объектов ответственного назначения, требует отдельного детального изучения.

В работе представлены результаты по исследованию влияния упругопластической деформации одноосным растяжением на изменение магнитных характеристик котельной стали 20К, применяемой для таких ответственных объектов машиностроения как сосуды, работающие под давлением, в том числе больших объемов до нескольких десятков м³. Измерения магнитных характеристик проводили как в замкнутой магнитной цепи, так и с использованием приставных магнитных устройств (ПМУ), причем как вдоль, так и поперек направления растяжения.

Измерения в замкнутой магнитной цепи позволяют определять магнитные характеристики вещества, а при помощи ПМУ – характеристики тела. Однако следует отметить, что проведение измерений в замкнутой магнитной цепи в производственных условиях является весьма сложнореализуемой задачей, и в основном на практике применяются именно ПМУ. При проведении измерений необходимо учитывать, что в замкнутой магнитной цепи промагничивается все сечение контролируемого объекта, а при использовании ПМУ глубина промагничивания определяется размерами полюсов ПМУ, поэтому для проведения корректных измерений необходимо соответствующим образом подбирать их геометрию.



Сопоставление диаграммы напряжение–деформация и зависимостей магнитных характеристик сталь 20 К от деформации

Диаграмма σ – ε имеет ярко выраженную площадку текучести, механические свойства стали 20К, определенные по диаграмме: $\sigma_{0,2} = 265$ МПа; $\sigma_B = 420$ МПа; $\delta = 32$ %; $\psi = 59$ %. Результаты исследования влияния деформаций на магнитные характеристики отожженных образцов стали 20К при упругопластическом деформировании одноосным растяжением приведены на рисунке. Наблюдается качественное подобие зависимостей коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости от приложенных напряжений диаграмме σ – ε , причем для коэрцитивной силы зависимость прямая, а для остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости – обратная. Подобные результаты уже получали для стали 45 [1]. Исключение составляет начальный участок деформирования, что связано с особенностями проявления магнитоупругого эффекта в ферромагнитных сталях [2]. Переход в область развитой пластической деформации сопровождается скачкообразным изменением величин магнитных параметров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-48-20-08-00392). Funding: The reported study was funded by RFBR № 20-48-20-08-00392.

Литература

1. Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками / Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, С. В. Смирнов, С. Ю. Митропольская, Д. И. Вичужанин // ФММ. – 2007. – Т.103 (3). – С. 322–327.
2. Влияние предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии) / Э. С. Горкунов, Ю. В. Субачев, А. М. Поволоцкая, С. М. Задворкин // Дефектоскопия. – 2015. – № 9. – С. 49–60.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭВОЛЮЦИИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Волегов П. С.^{а)}, Трусов П. В.^{б)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский пр., Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}crocinc@mail.ru; ^{б)}tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Эволюция поврежденности в материале – многостадийный и многоуровневый процесс трансформации микро- и мезодефектов. Особенностью этого процесса является высокая степень неоднородности полей напряжений и деформаций, возникающая вследствие физической неоднородности распределения дефектной структуры. Известно, что макросвойства материалов полностью зависят от мезо- и микроструктуры, в связи с чем для описания изменения их физико-механических характеристик в рамках концепции многоуровневого моделирования [1, 2] введено три структурных уровня: макроуровень, мезоуровень–I и мезоуровень–II. Каждому из уровней определены свои физические механизмы деформирования и накопления поврежденности (от образования зародышевых микротрещин, их стабилизации и подрастания до образования магистральной трещины). Модель позволяет рассматривать процесс от атомарных и дислокационных процессов зарождения микропор и микротрещин, через мезотрещины, образовавшиеся за счет слияния микроповреждений до образования макроскопической трещины.

Предполагается, что зарождение микротрещин происходит в результате эволюции дислокационной структуры, в частности скоплений дислокаций. Для описания образования скоплений дислокаций (областей с высокими локальными напряжениями) учитываются потоки дислокаций между структурными элементами мезоуровня–II (фрагментов). Для вычисления потоков учитываются следующие параметры для каждого из пары соседних элементов мезоуровня–II: наборы систем скольжения, скорость и направление движения дислокаций на каждой системе скольжения, ориентация границы между этими элементами. При переходе дислокаций в соседние элементы учитывается возможное образование дислокаций ориентационного несоответствия (ДОН), которые могут создавать дополнительное сопротивление движению дислокаций, а также привести к образованию микротрещины.

Рассмотрены некоторые возможные сценарии образования и развития микротрещин вблизи границ зерен. Так, возможен сценарий, когда время прохождения дислокации через границу больше, чем время образования новой дислокации в зерне, и следовательно, в зерне образуется скопление, в вершине которого возникают высокие внутренние напряжения. Если скорость притока дислокаций сравняется со скоростью прохождения через границу, то дислокационная конфигурация стабилизируется. Если же скорость притока выше, то напряжение в вершине скопления увеличивается до критической величины с возможным образованием микротрещины. Дополнительная диссипация энергии при развитии микротрещины происходит при переориентации трещины при прохождении через границу и при зарождении на границах новых микротрещин. Энергию диссипации при изменении траектории можно оценивать в зависимости от угла разориентации между зернами. При переориентации движущейся трещины возможна также перестройка дислокационной субструктуры, что увеличивает время пребывания фронта трещины около границы.

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

Литература

1. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры / П. В. Трусов, А. И. Швейкин, Е. С. Нечаева, П. С. Волегов // Физическая мезомеханика – 2012. – Т. 15 (1). – С. 33–56.
2. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с. – DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Дубинин Е. Ф., Куксова В. И.

*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН (ИМАШ РАН),
4, М.Харитоньевский пер., Москва, 101990, Российская Федерация,
e-mail: mibsts@mail.ru*

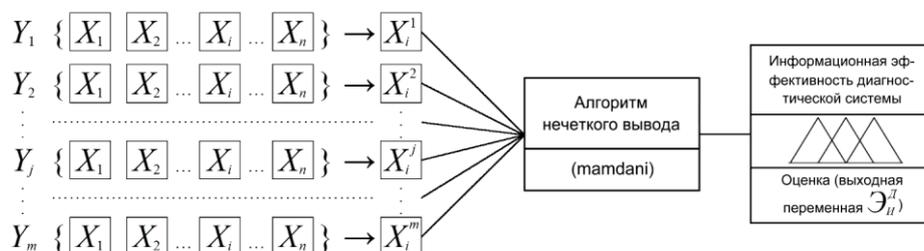
Развитие диагностических систем (ДС) в различных областях техники привело к необходимости моделирования, оценки и анализа эффективности самих ДС [1, 2]. Моделирование предполагает совместное использование в анализе различных переменных, хорошо описываемых методами нечеткой логики. Для оценки эффективности ДС с использованием данных методов предлагается использовать несколько подходов.

1. При поэлементном рассмотрении компонент ДС для оценки ее эффективности предлагается структурная схема ДС, позволяющая использовать трехуровневую систему взаимосвязанных нечетких множеств для анализа качества функционирования основных элементов ДС и системы в целом.

2. При исследовании эффективности решения основных задач диагностирования основными критериями эффективности диагностирования выбраны: а) минимизация времени диагностирования; б) точность определения состояния объекта диагностики (ОД).

В первом случае факторное пространство входных переменных нечеткой модели формируется из показателей, характеризующих точность, полноту обнаружения и глубину поиска дефектов. Во втором случае критериями эффективности диагностирования являются вероятностные показатели, характеризующие его достоверность, а факторное пространство модели формируется из множества точек в многомерном пространстве признаков, характеризующих возможные состояния (диагнозы) ОД.

3. Для определения информационной эффективности ДС предлагается использовать процедуру, предусматривающую использование критериальных параметров (рисунок).



Процедура оценки информационной эффективности ДС

Пусть $X_i, (i=1, n)$ – множество информационных характеристик ДС; $Y_j, (j=1, m)$ – множество показателей (оценок, событий), характеризующих проявление недостатков ДС.

В соответствии с приведенной схемой сначала для каждого показателя (оценки, события) из множества $Y_j, (j=1, m)$ экспертным путем выбирается критериальный параметр $X_i^j, (i=1, n)$, значение которого в наибольшей степени влияет на величину Y_j . Полученное подмножество критериальных параметров составляет факторное пространство нечеткой модели. В качестве выходной переменной используется нечеткая лингвистическая оценка \mathcal{E}_{II}^D «Информационная эффективность ДС» со значениями: низкая; ниже средней; средняя; выше средней; высокая. При формировании блока правил используется алгоритм нечеткого вывода Мамдани.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-2909575.

Литература

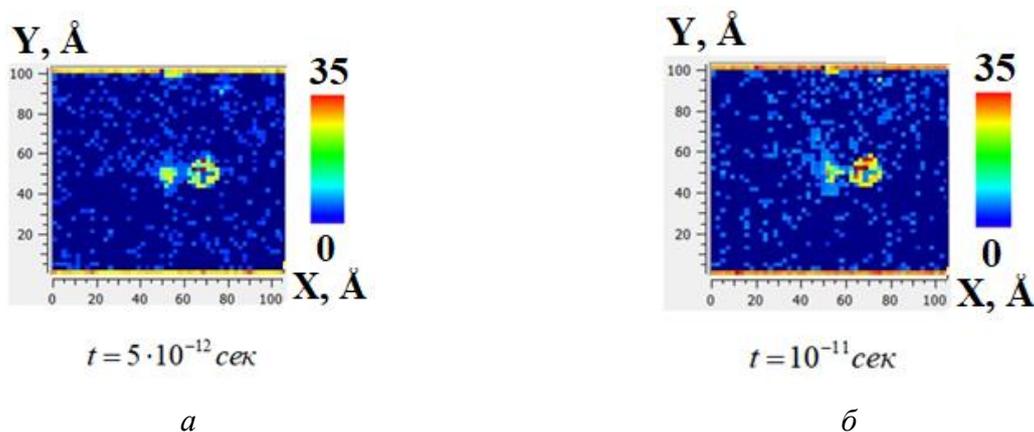
1. Оценка и повышение эффективности диагностических систем / Н. А. Махутов, Р. С. Ахметханов, Е. Ф. Дубинин, В. И. Куксова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2016. – № 4. – С. 8–24.
2. Kuksova V. I. Approaches to increasing the efficiency of systems of technical diagnostics // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 20. – P. 98–102. – DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.122.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОПОР И КРАЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ

Герасимов Р. М.^{а)}, Волегов П. С.^{б)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь 614000, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}romagrizly@gmail.com; ^{б)}crocinc@mail.ru*

Носителями процесса поврежденности принято считать микротрещины, образование и эволюция которых чаще связана с трансформацией скоплений дислокаций и дислокационных структур, формирующихся вблизи барьеров различной природы [1]. В качестве таких барьеров могут выступать и микропоры, для которых до сих пор открытым является вопрос о механизмах образования и взаимодействия с точечными дефектами типа вакансий и примесных атомов, а также линейных дефектов, в том числе дислокаций [2]. В связи с необходимостью дополнительного исследования механизмов зарождения и развития микроповреждений на атомарном уровне с использованием метода молекулярной динамики (МД) сформулирована, реализована и исследована математическая модель для описания взаимодействия микропор и краевых дислокаций в многокомпонентных системах, программно реализованы алгоритмы структурного анализа для исследования молекулярно-динамической системы.



Результаты расчета конфигурации дефектной структуры с помощью параметра общего соседства

С использованием предложенной модели показано, что микропора выступает в качестве стока точечных дефектов при взаимодействии с краевой дислокацией в рамках процесса неупругого деформирования (до 8,75 % относительной деформации). На рисунке изображены результаты моделирования процесса деформирования бинарной системы «железо–углерод» Fe-C с содержанием углерода до 0,8 %, что соответствует высокоуглеродистым сталям.

Для описания взаимодействия между атомами выбран потенциал межатомного взаимодействия типа EAM [3]. Для анализа дефектной структуры используется параметр общего соседства [4]. В начальный момент времени микропора и дислокация находились друг относительно друга на расстоянии 6,5 Å и не взаимодействовали. Для инициации взаимодействия производилось растяжение по направлению OX. На рисунке представлено полученное среднее значение параметра общего соседства [4] для исследуемого процесса взаимодействия дислокации и микропоры вдоль осей X и Y, вычисленное методом скользящего по исследуемой области объема. В ходе процесса деформирования ядро краевой дислокации начало притягиваться к микропоре (рисунок а), однако после контакта ядра и микропоры сформировалась конфигурация, изменение которой прекратилось вплоть до конца численного эксперимента (рисунок б). Кроме того, вблизи линии дислокации после формирования установив-

шейся конфигурации концентрация точечных дефектов стала значительно ниже, в то время как вблизи микропоры число дефектов увеличилось.

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

Литература

1. Контратьев Н. С., Трусов П. В. Описание упрочнения систем дислокационного скольжения за счет границ кристаллитов в поликристаллическом агрегате // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – Т. 1 (3). – С. 78–97.
2. Effect of Microvoid Formation on the Tensile Properties of Dual-Phase Steel / A. Ejaz, M. Tanvir, L. A. Kanwar, J. I. Akhter // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2000. – Vol. 9. – P. 306–310.
3. Hepburn D. J., Ackland G. J. Metallic–covalent interatomic potential for carbon in iron // Physical Review B. – 2008. – Vol. 78 (16). – 165115.
4. Tsuzuki H., Branicio P., Rino J. P. Structural characterization of deformed crystals by analysis of common atomic neighborhood // Computer Physics Communications. – 2007. – Vol. 177 (5) – P. 518–523.

ТРЕХУРОВНЕВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СЛОЖНОГО НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ, ВКЛЮЧАЮЩАЯ УЧЕТ ПЛОТНОСТЕЙ ДЕФЕКТОВ И ИХ ЭВОЛЮЦИЮ

Грибов Д. С.^{а)}, Трусов П. В.^{б)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614000, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}gribovds@pstu.ru; ^{б)}tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Термомеханические воздействия на металлические материалы широко применяются при изготовлении деталей и конструкций, которые приводят к существенному изменению физико-механических характеристик материалов, зависящих от микро- и мезоструктуры – типа решетки, количества и взаиморасположения дефектов, размеров и формы зерен [1, 2]. Сложное деформирование сопровождается существенной трансформацией дефектных структур, увеличением плотностей дефектов (даже при невысоких по интенсивности пластических деформациях). Для описания процессов неупругого деформирования в работе используется подход, основанный на введении внутренних переменных процесса (параметров, характеризующих мезо- и микроструктуру) и эволюционных уравнений для них [3].

Основной задачей работы является описание сложного монотонного и циклического пластического деформирования поликристаллического агрегата материалов с ГЦК-решеткой и различной энергией дефекта упаковки. Для построения детального физически обоснованного закона упрочнения, учитывающего изменение микроструктуры материала, используется дислокационная модель, учитывающая образование и аннигиляцию дислокаций, взаимодействие дислокаций с границами кристаллитов и другими дислокациями; особое внимание уделяется образованию барьеров.

При построении модели введены макроуровень, мезоуровень-1 и мезоуровень-2. Основным механизмом неупругого деформирования полагается движение краевых дислокаций. На макроуровне описывается поведение представительного объема материала. Макроуровень является иерархически старшим по отношению к мезоуровню-1, в качестве воздействия на мезоуровень-1 передаются градиенты скоростей перемещений (принимается гипотеза Фойгта). Неупругая составляющая тензора деформации скорости макроуровня определяется осреднением скоростей неупругих деформаций элементов мезоуровня-1. На мезоуровне-2 неупругое деформирование описывается с использованием уравнения Орована по плотностям дислокаций на системах скольжения и скоростям их движения; на мезоуровне-1 неупругое деформирование описывается скоростями сдвигов по кристаллографическим системам скольжения. Определяемые на мезоуровне-1 касательные напряжения на системах скольжения передаются в качестве воздействия на мезоуровень-2, где анализируется эволюция плотностей дефектов и описывается упрочнение, определяются скорости движения дислокаций, а по ним – скорости сдвигов по СС. С мезоуровня-2 на мезоуровень-1 передаются скорости сдвигов по системам скольжения.

В модели мезоуровня-2 используется разделение плотностей дислокаций по системам скольжения на положительные и отрицательные (в зависимости от направления экстраплоскости). Переменными мезоуровня-2 являются: плотности дислокаций, источников дислокаций, барьеров на расщепленных дислокациях. Закон упрочнения учитывает величину плотностей дислокаций и барьеров на системах скольжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Урал (17-41-590694-р а), Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект №0751-2020-0027)

Литература

1. Хирт Дж., Лотэ И. Теория дислокаций. – М. : Атомиздат, 1972. – 599 с.

2. Kocks U. F., Mecking H. Physics and phenomenology of strain hardening: the FCC case // *Progress in Material Science*. – 2003. – Vol. 48 (3). – P. 171–273. – DOI: 10.1016/S0079-6425(02)00003-8.
3. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с. – DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА СТАТИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Кондратьев Н. С.^{а)}, Трусов П. В.^{б)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}kondratevns@gmail.com; ^{б)}tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Термомеханическая обработка металлов и сплавов широко применяется в производстве для формирования требуемой структуры материалов на различных масштабных уровнях, которая определяет макрохарактеристики готовой конструкции. Методы математического моделирования позволяют находить оптимальные режимы получения и обработки металлических изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками. Следовательно, актуальной является проблема разработки и построения новых физико-математических моделей материалов, которые описывают эволюцию структуры в процессе обработки поликристаллов. Эффективным и гибким инструментом для глубокого анализа эволюции материальной структуры на различных масштабных уровнях является многоуровневый подход к описанию поведения поликристаллических материалов, в котором в явном виде рассматриваются физические механизмы и носители протекающих процессов [1]. Основным элементом таких моделей являются внутренние переменные, эволюция которых отражает изменение дефектной структуры в материале. С применением указанного класса моделей можно ставить задачи управления процессами термомеханического воздействия на поликристаллы с целью формирования необходимых рабочих характеристик готовых изделий и конструкций. Формулируется задача исследования эволюции зеренной (субзеренной) структуры в процессе статической рекристаллизации, ее влияния на физико-механические свойства. Представлена структура многоуровневой модели для описания эволюции зеренной, субзеренной, дефектной структуры материала в процессе предварительной пластической деформации, последующего нагрева и выдержки при заданной температуре, приводящих к статической рекристаллизации. Исследуется механизм рекристаллизации, основанный на движении исходных участков большеугловой границы. Движущей силой этого процесса является разность запасенной энергии в соседних субзернах, имеющих общую большеугловую границу, при этом увеличение поверхностной энергии межзеренной границы препятствует ее перемещению [2]. Запасенная в результате пластического деформирования энергия прежде всего определяется плотностью дислокаций в кристаллическом материале, межзеренная энергия – кристаллографической разориентацией соседних субзерен различных зерен. В результате рекристаллизации происходит поглощение дефектных зерен с повышенной запасенной энергией менее дефектными соседними зернами. Это вызывает изменение среднего размера зерен в поликристалле, высвобождение запасенной энергии, как следствие – изменение одной из основных механических характеристик – предела текучести. В численных экспериментах показано существование критического значения пластической деформации, до достижения которого рекристаллизация не происходит.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-69-47009).

Литература

1. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.
2. Beck P. A., Sperry P. R. Strain induced grain boundary migration in high purity aluminum // Journal of Applied Physics. – 1950. – Vol. 21 (2). – P. 150–152.

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ: ОПИСАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ МИКРОТРЕЩИН

Курмоярцева К. А.^{а)}, Котельникова Н. В.^{б)}, Волегов П. С.^{в)}, Трусов П. В.^{г)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский пр., Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}kurmoiartseva.k@mail.ru; ^{б)}kotelnickova@gmail.com; ^{в)}crocinc@mail.ru; ^{г)}tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Определение срока службы и диапазона допустимых рабочих характеристик при эксплуатации деталей и конструкций является одной из важных современных задач. Математические модели поликристаллических материалов представляют собой перспективный инструмент для описания процессов деформирования и разрушения, поскольку позволяют исследовать отклик детали при различных режимах нагружения, а также описывать изменения структуры материала и различные физические эффекты, в том числе связанные с формированием микротрещин [1]. Для корректного описания физических процессов необходим учет эволюции дефектной структуры материала и рассмотрение в явной форме соответствующих механизмов на всех масштабных и структурных уровнях [2]. Цель исследования – разработка прямой математической многоуровневой модели, основанной на физической теории упруго-вязкопластичности.

В рамках выбранного подхода в материале выделяется несколько структурных уровней, для каждого из которых определяются ведущие механизмы деформирования и накопления поврежденности. На макроуровне решается краевая задача для совокупности зерен, составляющих представительный макрообъем. На мезоуровне выделяются два структурных уровня: мезоуровень-I и мезоуровень-II. Деформирование отдельных кристаллитов (зерен, субзерен) рассматривается на мезоуровне-I. Мезоуровень-II введен для анализа эволюции дислокационной структуры, в частности плотностей дислокаций, и определения областей с высокими локальными напряжениями, что может вести к инициированию зарождения и распространения микротрещин. Рассматриваются следующие механизмы: зарождение новых дислокаций, аннигиляция разноименных дислокаций на каждой из систем скольжения и приток или отток дислокаций из соседних элементов мезоуровня-II.

Ключевой особенностью разрабатываемой модели является включение в рассмотрение не только деформирования, но и процессов накопления поврежденности, которые в свою очередь являются многостадийными и многоуровневыми и связанными с эволюцией дефектов различной природы. Предполагается, что образование микротрещин происходит за счет взаимодействия дислокаций друг с другом и с барьерами различной природы. Для описания зарождения трещины используем модель Стroh [3]. В соответствии с этой моделью необходимым условием зарождения микротрещины является образование дислокационного скопления критической длины вблизи некоторого непреодолимого препятствия для дислокаций. Для описания этого процесса в модель мезоуровня-II введен параметр, который позволяет определить наличие микротрещины в рассматриваемой области. При этом учитывается прежде всего плотность дислокаций. В зависимости от рассматриваемых физических механизмов разрушения, а также от материала параметр поврежденности может зависеть и от других параметров материала, например от барьерных напряжений.

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

Литература

1. Volegov P. S., Gribov D. S., Trusov P. V. Damage and fracture: Crystal plasticity models // Physical Mesomechanics. – 2017. – Vol. 20 (2). – P. 174–184.
2. Трусов П. В., Волегов П. С., Кондратьев Н. С. Физические теории пластичности. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.
3. Stroh A. N. The formation of cracks as a result of plastic flow // Proc. R. Soc. London Ser. – 1954. – A 223. – P. 404–414.

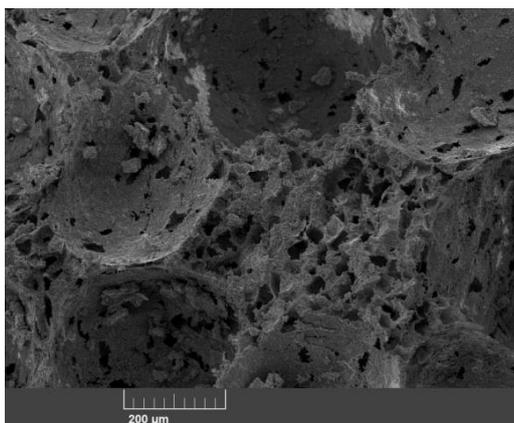
СВОЙСТВА НИКЕЛЕВОГО МАТЕРИАЛА С БИМОДАЛЬНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Шустов В. С., Зеленский В. А., Анкудинов А. Б., Гнедовец А. Г.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
д. 49, Ленинский пр-т, Москва, 119334, Российская Федерация,
e-mail: _Nemo_73@mail.ru*

Цель исследования – определение влияния количественного соотношения и размера частиц порообразователя, в качестве которого выступали порошки хлорида натрия двух фракций, на такие функциональные характеристики материала как проницаемость и лимитирующий размер пор.

Методами порошковой металлургии прессования и спекания смеси порошков никеля и порообразователя были получены пористые материалы с бимодальным распределением пор по размеру. В качестве исходных компонентов были использованы нанопорошок никеля, полученный методом электрического взрыва проводника, и порошки хлорида натрия различных фракций – с размером частиц в диапазонах 40–50 мкм и 315–400 мкм. Порошки металла-основы и порообразователя были взяты в отношении 20 об. % Ni: 80 об. % NaCl. При этом для разных образцов порообразователем выбрали смесь двух порошков хлорида натрия с различной дисперсностью, взятых в объемном отношении 85:15, 65:35 или 50:50. После смешения порошков в турбулентном смесителе производилось их одностороннее прессование при 300 МПа в цилиндрической матрице. Полученную прессовку спекали в потоке водорода при температуре 700 °С в течение 1 ч, после чего порообразователь вымывался в воде. На рисунке представлена фотография пористой структуры полученного материала, сделанная с помощью растрового электронного микроскопа.



Фотография микроструктуры пористого никеля с бимодальным распределением пор по размеру порошков с частицами 315–400 мкм и 40–50 мкм.

Крупные поры, образовавшиеся вследствие применения порообразователя с размером частиц от 315 до 400 мкм, ограничены областями, в которых материал обладает тонкой пористой структурой с размером пор, соответствующим размеру частиц более мелкого порообразователя – 40–50 мкм. Некоторые такие поры выходят на поверхность более крупных пор.

В таблице представлены результаты определения пористости, проницаемости и лимитирующего размера пор полученных материалов. С увеличением доли более мелкого порошка хлорида натрия в исходной шихте растет проницаемость материала. Исследование лимитирующего размера пор в материале, однако, не позволяет установить зависимость от соотношения порошков порообразователя, при этом достигает наибольшего из измеренных значений при равных объемных долях порошков.

Характеристики получаемых материалов

Свойства	Соотношение порошков соли 315–400 мкм и 40–50 мкм соответственно		
	65:35	50:50	15:85
Пористость, %	82,5	82,6	81,8
Проницаемость, 10^{-12} м^2	0,05	0,11	0,2
Лимитирующий размер пор, мкм	8	17	8

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 20-08-00960.

МЕХАНИЧЕСКИЕ И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВОВ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ СДВИГОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Соковиков М. А., Симонов М. Ю., Оборин В. А.,
Чудинов В. В., Наймарк О. Б.

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

Цель работы – теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение определяющей роли структурных переходов в ансамбле дефектов мезоуровня (микросдвигов и микротрещин) как одного из механизмов локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении [1].

Эксперименты по динамическому нагружению образцов проводились на стержне Гопкинсона–Кольского и при пробивании преград. Термодинамика процесса деформирования с целью идентификации характерных стадий локализации деформации исследовалась «in-situ» регистрацией температурных полей с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M [2].

Измеренная температура в зоне локализации не подтверждает традиционные представления о механизме локализации деформации, обусловленном термопластической неустойчивостью. Сохраненные после эксперимента образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа. Структурный анализ показал коррелированное поведение ансамбля дефектов, которое может быть классифицировано, как структурный переход, обеспечивающий локализацию деформации.

Данные экспериментальных исследований, изучение структуры деформированных образцов, а также данные численного моделирования [3–8], проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов при реализованных условиях нагружения обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 17-41-590149 p_a, 18-08-01186_a, 19-48-590009 p_a.

Литература

1. Наймарк О. Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6 (4). – С. 45–72.
2. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации / М. А. Соковиков, Д. А. Билалов, В. В. Чудинов, С. В. Уваров, О. А. Плехов, А. И. Терехина, О. Б. Наймарк // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40 (23). – С. 82–88.
3. Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении / Д. А. Билалов, М. А. Соковиков, В. В. Чудинов, В. А. Оборин, Ю. В. Баяндин, А. И. Терехина, О. Б. Наймарк // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8 (3). – С. 319–328.
4. Билалов Д. А., Соковиков М. А., Чудинов В. В. Многомасштабные механизмы локализации пластической деформации при пробивании преград // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 5. – С. 43–47.
5. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому

сдвигу / Д. А. Билалов, М. А. Соковиков, В. В. Чудинов, В. А. Оборин, Ю. В. Баяндин, А. И. Терехина, О. Б. Наймарк // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10 (1). – С. 103–112.

6. Изучение механизма разрушения сплавов локализованным сдвигом при динамическом нагружении / М. А. Соковиков, В. В. Чудинов, В. А. Оборин, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12 (3). – С. 301–312.

7. Описание эффекта падения прочности сплава АМгб с ростом температуры при динамическом нагружении / Д. А. Билалов, М. А. Соковиков, Ю. В. Баяндин, В. В. Чудинов, В. А. Оборин, О. Б. Наймарк // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – № 5. – С. 5–14.

8. The study of mechanical and microstructural aspects of localized shear fracture in metals under dynamic loading / M. A. Sokovikov, S. V. Uvarov, M. Yu. Simonov, V. A. Oborin, V. V. Chudinov, O. B. Naimark // Science Direct Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 18. – P. 262–267.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В НЕКОТОРЫХ МОДЕЛЬНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Владимиров А. П.¹, Друкаренко Н. А.¹, Павлов П. В.²

¹ИМАШ УрО РАН,

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

e-mail: var52@bk.ru

²ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

д. 153 ул. Краснознаменная, г. Воронеж, 394052, Российская Федерация,

e-mail: pashok8208@mail.ru

Несмотря на большое число публикаций по многоциклового усталости материалов и элементов конструкций, в настоящее время отсутствуют физические модели многоциклового усталости. В связи с этим разработка новых физических методов измерения и контроля, позволяющих изучать усталостные явления без остановки усталостных испытаний образцов и эксплуатации деталей, является актуальной задачей. Цель доклада – обзор исследований, проведенных авторами по использованию спекловых изображений для изучения особенностей усталостных явлений в некоторых материалах при их испытании на многоциклового усталость.

Суть метода заключается в освещении изучаемого объекта лазерным излучением, формировании его спеклового изображения и контроле над изменениями спекловой картины. Диаметр диафрагмы объектива следует выбрать так, чтобы минимальный размер спекла (пятна) сделать чуть больше размера пикселя используемой телекамеры, а время экспозиции нужно выбрать кратным периоду циклических деформаций. Если в процессе испытания на усталость на освещенной лазером отражающей поверхности или внутри освещенного через матовое стекло прозрачного объекта отсутствуют необратимые процессы, то картина усредненных во времени спекловых изображений будет неизменной. Если же в указанных объектах возникнут необратимые процессы, изменяющие разность оптических путей волн на величину порядка 1 нм на базе $\Delta x \geq 1$ мкм, то спекловые изображения будут меняться. В публикациях [1, 2] подобно изложены теория метода и особенности его применения.

В докладе обсуждаются оптические явления, обнаруженные при испытании на усталость образцов с надрезом, изготовленных из двух марок сталей, а также образцов с надрезом и без надреза, изготовленных из двух типов оргстекла. Рассматриваются физические величины, характеризующие усталостную деградацию материалов, в том числе их предельные значения, соответствующие зарождению трещины. По скорости изменения величин и их предельным значениям появляется возможность оценивать время до старта трещины.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00392_a.

Литература

1. Alexander P. Vladimirov. Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media // Optical Engineering. – 2016. – Vol. 55 (12). – Vol. 121727. – P. 1–10. – DOI: 10.1117/1.OE.55.12.121727.
2. Vladimirov A.I. Dynamic Speckle Interferometry of Technical and Biological Objects // Interferometry – Recent Developments and Contemporary Applications : open access peer-reviewed chapter. – Mithun Bhowmick and Bruno Ullrich, IntechOpen, 2018. – DOI: 10.5772/intechopen.81389. – Available from: <https://www.intechopen.com/books/interferometry-recent-developments-and-contemporary-applications/dynamic-speckle-interferometry-of-technical-and-biological-objects>

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Нефедова О. А.^{а)}, Спевак Л. Ф.^{б)}

ИМАШ УрО РАН,

д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация,

e-mail: ^{а)}nefedova@imach.uran.ru; ^{б)}lfs@imach.uran.ru

Работа посвящена разработке параллельного алгоритма и программы для решения статических задач теории упругости в осесимметричных областях при осесимметричных граничных условиях.

В основе численного решения лежит метод граничных элементов [1]. Дискретизация граничного интегрального уравнения приводит к системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных граничных значений компонент векторов перемещений и поверхностных напряжений. Коэффициентами системы являются интегралы по граничным элементам от фундаментального решения [1]. Существенной особенностью осесимметричных задач является содержание специальных функций – полных эллиптических интегралов первого и второго рода – в выражениях для фундаментального решения. Это делает невозможным аналитическое вычисление интегралов. В связи с этим интегралы вычисляются численно с помощью простой квадратурной схемы Гаусса, за исключением интегралов по элементам, содержащим точки сингулярности эллиптических интегралов. Вычисление таких интегралов было выполнено с использованием адаптивных функций интегрирования, включенных в библиотеку GNU Scientific Library (GSL) [2]. Для эффективной реализации алгоритма была использована заложенная в методе граничных элементов возможность распараллеливания счета. Вычислительный алгоритм был распараллелен на каждом этапе решения задачи: в процессе построения системы линейных уравнений, при решении системы, а также при расчете напряженно-деформированного состояния во внутренних точках области.

Разработанный алгоритм решения был реализован в виде программы, написанной на языке программирования C++ с использованием технологии параллельного программирования. Для выполнения численных расчетов были использованы библиотеки BOOST C++ и GSL. Для организации параллельных вычислений был привлечен стандарт MPI [3].

Разработанная программа была успешно протестирована сравнением результатов расчетов с известными точными решениями. Она дополняет разработанный авторами ранее комплекс программ для решения краевых задач для уравнений эллиптического типа: плоских задач теории упругости, а также плоских и осесимметричных задач теории потенциала. Комплекс может быть использован для решения широкого спектра исследовательских и прикладных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-07-00407).

Литература

1. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. – М. : Мир, 1987. – 524 с.
2. GSL-GNU Scientific Library – Available at: <http://www.gnu.org/software/gsl/>
3. The Message Passing Interface (MPI) standard. – Available at: <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpi/>

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ ДИАГНОСТИКИ

Комаров Д. В.^{1,2}, Коновалов С. В.¹, Комиссарова С. А.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
34, Московское шоссе, г. Самара, 443086, Российская Федерация,
e-mail: komarov_dimitriy@mail.ru

²ООО «Газпром трансгаз Самара»,
106 а, ул. Ново-Садовая, г. Самара, 443086, Российская Федерация

В настоящий момент в единую систему газоснабжения ПАО «Газпром» входит более 172 тыс. км магистральных газопроводов (МГ). Время эксплуатации большей части из них приближается к сроку службы, установленному в проектной документации на указанные объекты, что обязывает газотранспортные общества, в соответствии с действующим законодательством, проводить комплекс взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, направленных на предупреждение аварий и инцидентов (техническое диагностирование, ремонт, экспертиза промышленной безопасности и т. д.).

С точки зрения экономической целесообразности наиболее эффективным методом диагностики протяженных МГ является внутритрубное техническое диагностирование (ВТД). Однако применяемый при ВТД принцип измерения интенсивности рассеивания магнитного поля не является методом прямого измерения, поэтому для обеспечения достоверности получаемых данных выполняется их корректировка по результатам дополнительного дефектоскопического контроля (ДДК) в шурфах. В ходе ДДК металла труб применяются следующие виды контроля: визуально-измерительный (ВИК), ультразвуковой (УЗК), вихретоковый (ВК), магнитопорошковый (МК), рентгеновский (РК), капиллярный (КК). На основании скорректированных данных разрабатываются производственные программы обследования потенциально-опасных участков (ПОУ) МГ в шурфах.

За весь период эксплуатации МГ в ООО «Газпром трансгаз Самара» (Общество) по результатам ВТД было выявлено несколько тысяч дефектных труб с потенциально-опасными дефектами. Поэтому для хранения такого большого массива данных, а также контроля выполнения производственных программ обследования ПОУ, в Обществе используется соответствующая база данных [2]. Разработанная система снабжена модулем по анализу сходимости данных ВТД и ДДК в шурфах, при помощи которого определяется не только конвергенция геометрических размеров дефектов, выявленных различными способами обследования, но и оценивается качество работы подрядных организаций, выполняющих ВТД. Также в базе, как и в системе, описанной в статье [3], реализовано хранилище копий технических документов, с которых в нее внесены данные. Оперативное обращение к исходной информации позволяет пользователю при необходимости экспертно в ручном режиме вносить изменения в выполняемый анализ сходимости.

Сегодня ВТД магнитными дефектоскопами позволяет с высокой вероятностью (более 90 %) идентифицировать потерю металла, дефекты геометрии и аномалии кольцевых швов. В то же время вероятность распознавания коррозионного растрескивания под напряжением составляет около 50 %. Расширить возможности ВТД в части выявления, идентификации и определения размеров широкого класса дефектов возможно при использовании электромагнитно акустической технологии в комбинировании с традиционной магнитной дефектоскопией. ВИК, УЗК, ВК, МК, РК и КК обеспечивают вероятность идентификации дефектов стенки труб до 100 %. Однако в некоторых случаях обеспечение такой высокой вероятности возможно только при проведении металлографических исследований.

Литература

1. Система контроля выполнения программ обследования потенциально опасных участков трубопроводов по результатам внутритрубной диагностики : свид. о государственной регистрации базы данных 2018621558 Рос. Федерация. / Жуков Д. В., Колесников А. В. ;

заявитель и правообладатель ООО «Газпром трансгаз Самара». – № 2017614631; заявл. 22.05.2017 ; опубл. 08.11.2017. – 1 с.

2. Щербо И. В., Холодков С. А., Жуков Д. В. Опыт разработки и эксплуатации информационной системы обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 3. – С. 66–72.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Никитюк А. С.^{1, а)}, Воронина А. О.^{2, б)}, Белоглазова Ю. А.^{2, в)}, Гагарских О. Н.^{2, г)},
Гришко В. В.^{2, д)}, Наймарк О. Б.^{1, е)}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН,

д. 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}nas@icmm.ru; ^{е)}naimark@icmm.ru

²Институт технической химии УрО РАН,

д. 3, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: ^{б)}voroninaao@gmail.com; ^{в)}beloglazova.yu.a@gmail.com;

^{г)}gagarsckih.olga@yandex.ru; ^{д)}grishvic@gmail.com

Рак является второй из основных причин смерти в мире. В 2018 г. от онкологических заболеваний умерло 9,6 млн человек. Лазерная интерференционная микроскопия (ЛИМ) является одним из наиболее перспективных методов исследования рака. Этот метод позволяет изучать морфометрию и динамику живых неокрашенных и нефиксированных клеток. Лазерная интерференционная микроскопия основана на современных методах обработки интерферограмм, что позволяет получать изображения, которые содержат количественную информацию как о локальной толщине, так и об индексе преломления клеточной структуры. Преимуществами ЛИМ являются высокое пространственное разрешение, неинвазивный мониторинг и отсутствие специальных требований к подготовке образца (химические красители или среда, в которой происходит измерение). Исследование посвящено оценке функционального состояния опухолевых клеток с использованием оригинальных данных лазерной интерференционной микроскопии с целью обоснования фенотипических маркеров раковых и нормальных клеток. В качестве материалов исследования выступали стандартизированные линии опухолевых клеток и клетки образцов тканей человека, пораженные раком. Измерения морфометрических характеристик и динамики живых клеток проводили с помощью лазерного модуляционного интерференционного микроскопа МИМ-340. Для оценки функционального состояния клеток по полученным данным ЛИМ использовались алгоритмы построения фазовых портретов и мультифрактального анализа. На основе анализа результатов статистического анализа функционального состояния опухолевых и нормальных клеток показано, что они отличны по ширине мультифрактального спектра, а именно: раковые клетки имеют монофрактальные, в то время как живые демонстрируют признаки мультифрактальных объектов. Таким образом, объективными критериями злокачественного перерождения являются признаки монофрактальности. Полученные результаты в дальнейшем могут оказаться перспективными в качестве ранних диагностических маркеров злокачественной трансформации клеток и определения чувствительности (устойчивости) клеток опухоли конкретного пациента к противоопухолевым препаратам.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60718X0202).

FATIGUE PREDICTION ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF PROBABILISTIC MECHANICAL PROPERTIES

Nikolay A. Makhutov, Vladimir V. Zatsarinny, Dmitry O. Reznikov

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
4, Maly Kharitonyevskiy Lane, Moscow, 101990, Russian Federation,
e-mail: imashreznikoff@yandex.ru*

Traditional engineering methods for the assessment of fatigue lifetime use characteristics of fatigue resistance. These methods are based on deterministic parameters that are included in the governing equations. These parameters include applied stresses, numbers of cycles, critical stresses and numbers of cycles to failure (that vary in the range from 10^5 to 10^7). The relationships between these parameters are determined by safety factors for strength and durability. In this case, probabilistic assessments of fatigue resistance that are based on two-parameter equations for safety factors appear to be quite simple. They are easily determined during fatigue tests.

For broad ranges of the numbers of cycles (varying from 10^0 to 10^{12} cycles), fatigue resistance depends on ultimate strength, plasticity limit, moduli of elasticity and other characteristics. Here, the traditional approach becomes labor-intensive and time-consuming. These difficulties increase dramatically when the probabilistic approach is applied to describe loading conditions.

The paper presents the results of experimental studies and calculations of strengths and durability for low-alloy and austenitic steels with varying mechanical properties.

The work was financially supported by RFBR grant No 20-58-00019_Бел_a.

МОДИФИКАЦИЯ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СИСТЕМАХ СКОЛЬЖЕНИЯ В ТЕРМИНАХ РАЗГРУЖЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Окатьев Р. С.^{а)}, Трусов П. В.^{б)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, Пермский край, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}okatjevrs@gmail.com; ^{б)}tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Рассмотрен вопрос о корректной формулировке в рамках двухуровневой упруго-вязкопластической модели соотношения мезоуровня для определения действующих касательных напряжений на системах скольжения в терминах разгруженной конфигурации. При формулировке задачи в терминах разгруженной конфигурации для этого обычно используются второй тензор напряжений Пиолы-Кирхгоффа [1] или тензор Манделя [2]. Однако вопрос об определении критических касательных напряжений при этом не обсуждается – как правило, записываются соотношения, по виду аналогичные закону Шмида в актуальной конфигурации.

Физически обоснованным представляется выбор в качестве исходного соотношения выражения для действующих касательных напряжений на системах скольжения в терминах актуальной конфигурации (закон Шмида). Далее, выражая касательные напряжения, определенные по тому или иному тензору напряжений в разгруженной конфигурации, через касательные напряжения из закона Шмида, записанного в терминах актуальной конфигурации, можно получить физически корректные соотношения для определения касательных напряжений на системах скольжения в терминах разгруженной конфигурации.

Для вывода соотношений используется разложение движения, предложенное в работе [3]. Градиент деформации при этом представляется в виде мультипликативного разложения на упругую (искажение решетки), ротационную и пластическую составляющие; под ротацией понимается поворот кристаллической решетки как жесткого целого. Вводится жесткая подвижная декартова ортогональная система координат (ПСК), которая совпадает в отсчетной конфигурации с кристаллографической системой координат (КСК) и связана с ней в каждый момент деформирования; упругие свойства материала в ПСК остаются постоянными. Однако оказывается, что результаты расчетов НДС зависят от конкретного выбора связи ПСК с КСК [3, 4].

В предположении малости упругих искажений решетки получены соотношения, связывающие действующие касательные напряжения, определенные в терминах разгруженной конфигурации по тензору Манделя и второму тензору Пиолы–Кирхгоффа, с действующими касательными напряжениями в актуальной конфигурации. Полученные соотношения встраиваются в двухуровневую модель для описания поведения моно- и поликристаллических материалов. Приведены результаты расчетов НДС при сложном нагружении. Показано, что введенное определение касательных напряжений на системах скольжения позволяет устранить зависимость результатов моделирования от выбора связи ПСК с КСК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-41-590694-р_а).

Литература

1. Kalidindi S. R., Bronkhorst C. A., Anand L. Crystallographic texture evolution in bulk deformation processing of FCC metals // J. Mech. Phys. Solids. – 1992. – Vol. 40 (3). – P. 537–569.
2. Marano A., Гйльбарт L., Forest S. Intragranular localization induced by softening crystal plasticity: Analysis of slip and kink bands localization modes from high resolution FFT-simulations results // Acta Materialia. – 2019. – Vol. 175. – P. 262–275.
3. Трусов П. В., Швейкин А. И., Янц А. Ю. О разложении движения, независимых от выбора системы отсчета производных и определяющих соотношениях при больших гра-

диентах перемещений: взгляд с позиций многоуровневого моделирования // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19 (2). – С. 47–65.

4. Shveykin A. I., Trusov P. V. Multilevel models of polycrystalline metals: comparison of relations describing the crystallite lattice rotations // Nanoscience and Technology. – 2019. – Vol. 10 (1). – P. 1–20.

ОПИСАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ В МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЯХ МЕТАЛЛОВ

Останина Т. В.^{а)}, Трусов П. В.^{б)}, Швейкин А.И.^{в)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}tv-ostanina@yandex.ru; ^{б)}tpv@matmod.pstu.ac.ru; ^{в)}alexsh59@bk.ru*

Процессы получения изделий из поликристаллических металлов и сплавов с ультрамелкозернистой структурой в последние десятилетия все шире используются в различных отраслях машиностроения. Возможность оптимального сочетания механических свойств в металлах и сплавах с нано- и субмикронной структурой открывает перспективы их применения в качестве новых конструкционных и функциональных материалов [1]. Для проведения корректного моделирования процессов интенсивной пластической деформации для получения мелкозернистых материалов необходима конститутивная модель материала, базирующаяся на положениях и соотношениях современных нелинейных физики и механики деформируемого твердого тела, позволяющая учитывать наиболее важные физические механизмы деформирования и изменение структуры на различных масштабных уровнях. В связи с этим перспективной представляется разработка многоуровневых моделей поликристаллических металлов и сплавов [2].

Цель данной работы – создание многоуровневой модели для описания поведения металлов и сплавов, включающей явное описание измельчения зеренной структуры, согласующееся с физическим анализом данного процесса при интенсивных пластических деформациях при умеренных температурах. Проведенный аналитический обзор работ по данному направлению позволяет заключить, что ключевой причиной, вызывающей развороты ячеек, является возникновение моментных факторов за счет несовместности дислокационного скольжения в соседних кристаллитах и силовых полях дисклинаций.

В многоуровневой модели рассматривается представительный макрообъем поликристалла, состоящий из различно ориентированных элементов мезоуровня – кристаллитов – и границ кристаллитов. Для описания деформирования кристаллитов (на мезоуровне) используется физическая теория упруговязкопластичности [2]. Для описания изменения дефектных структур на микроуровне используются эволюционные уравнения для плотностей дислокаций, дополненные учетом взаимодействия дисклинаций с подвижными дислокациями – часть подвижных дислокаций захватывается дисклинациями, что приводит к изменению мощности существующих дисклинаций и образованию новых дефектов дисклинационного типа. После достижения мощностью дисклинаций критического значения в результате действия напряжений от дисклинации для обеспечения совместности деформации происходит образование дислокационной стенки, представимое как движение частичной дисклинации со стыка в объем зерна [3]. Распространение дислокационной стенки, описываемое путем внесения малых разориентировок (с разными знаками) в составляющие границу фрагменты, осуществляется по той границе между кристаллитами (потенциальными фрагментами) из составляющих тройной стык, на которой действуют максимальные моментные напряжения, при этом мощность исходной дисклинации в тройном стыке снижается.

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

Литература

1. Валиев Р. З., Наймарк О. Б. Объемные наноструктурные материалы: уникальные свойства и инновационный потенциал // Инновации. – 2007. – Т. 12 (110). – С. 70–76.

2. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.
3. Рыбин В. В., Перевезенцев В. Н., Свирина Ю. В. Физическая модель начальных стадий фрагментации поликристаллов в ходе развитой пластической деформации // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118 (12). – С. 1243–1247.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ КЛАСТЕРЫ ЗЕРЕН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Ташкинов А. А.^{а)}, Шавшуков В. Е.^{б)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}shavshukov@pstu.ru; ^{б)}tash@pstu.ru*

Поликристаллические материалы являются гетерогенными агрегатами упруго и пластически анизотропных зерен. Микроструктура поликристаллов имеет случайную природу, поля мезодеформаций и мезонапряжений неоднородны и сильно флуктуируют. Деформированное состояние каждого зерна зависит от состояний всех других зерен и взаимодействий с ними. В последние годы было экспериментально обнаружено, что в случайных микроструктурах поликристаллов существуют специфические кластеры зерен, в которых локальные мезодеформации намного больше макродеформаций [1]. Вероятность образования таких кластеров достаточно мала, но они существенно влияют на некоторые критические явления. Например при гигацикловой усталости эти кластеры являются очагами зарождения микротрещин. Обычно максимум деформаций имеет место в центральном зерне кластера. Величина максимума сильно зависит от взаимодействия с зернами окружающей микроструктуры [2]. Вследствие низкой вероятности наблюдения экстремальных кластеров трудно исследовать их структуру и возможные паттерны экспериментально. Адекватным подходом является проведение вычислительных экспериментов. Для вычислительного поиска структур экстремальных кластеров нужно сгенерировать огромное количество численных моделей случайных микроструктур поликристаллического тела, решить для каждой модели краевую задачу деформирования и выбрать модель с максимальными деформациями. При большом числе зерен в моделях такая задача не может быть решена прямым компьютерным моделированием. Здесь мы представляем теоретическое рассмотрение проблемы, основанное на нашем теоретико-полевом подходе к механике деформирования поликристаллов [3].

В теоретико-полевом подходе локальные мезодеформации удовлетворяют системе интегральных уравнений, которая гласит, что деформация в любом зерне есть суперпозиция однородной макродеформации и результатов взаимодействия с деформациями во всех остальных зернах поликристалла. С помощью кусочно-постоянной аппроксимации система интегральных уравнений трансформируется в систему линейных алгебраических, которая решается методом теории возмущений по межзеренному взаимодействию. Аддитивная природа взаимодействий кардинально сокращает объем необходимой вычислительной работы, делая возможным обчислять модели с очень большим числом зерен. Приведены примеры паттернов экстремальных кластеров для нескольких типов поликристаллов при различных нагружениях [4]. Паттерны имеют симметричную структуру. В центре экстремальных кластеров имеются субкластеры из небольшого числа одинаково ориентированных зерен. Зерна-соседи вокруг центрального зерна образуют цепочки максимальной жесткости на растяжение. Они играют роль силовых тяг, усиливающих деформационное воздействие на центральное зерно. Это напоминает формирование силовых цепочек в гранулированных средах, в которых локализуется распространение силового воздействия на среду.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 18-01-00675.

Литература

1. Miao J., Pollock T. M., Jones J. Microstructural extremes and the transition from fatigue crack initiation to small crack growth in a polycrystalline nickel-base superalloy // Acta Materialia. – 2012. – Vol. 60. – P. 2840–2854. – DOI: 10.1016/j.actamat.2012.01.049.
2. Abdolvand H., Wright J. & Wilkinson A. Strong grain neighbour effects in polycrystals // Nature Communications. – 2018. Vol. 9 (171). – P. 1–11. – DOI: 10.1038/s41467-017-02213-9.

3. Shavshukov V. and Tashkinov A. Quantum field theory approach to mechanics of polycrystals // *Solid State Phenomena*. – 2016. – Vol. 243. – P. 131–138. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.243.131.
4. Шавшуков В. Е. Экстремальные флуктуации деформаций в поликристаллических материалах // *Физическая мезомеханика*. – 2018. – Т. 21 (5). – С. 67–75. – DOI: 10.24411/1683-805X-2018-15007.

МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Швейкин А. И.^{а)}, Трусов П. В.^{б)}, Шарифуллина Э. Р.^{в)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, пр. Комсомольский, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}shveykin@pstu.ru; ^{б)}tpv@matmod.pstu.ac.ru; ^{в)}elvira16_90@mail.ru*

Для совершенствования существующих и разработки новых методов термомеханической обработки с целью получения материалов и изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками необходимо построение моделей материалов, способных описывать изменение структуры при деформировании и учитывать ее влияние на параметры процесса и эффективные свойства материала на макромасштабном уровне. В последние десятилетия для решения этой проблемы все большее признание находит подход, основанный на явном введении в структуру определяющих соотношений параметров, называемых внутренними переменными и отражающих состояние и изменение мезо- и микроструктуры и формулировки на базе сведений из физики твердого тела и физического материаловедения эволюционных уравнений для этих параметров. В рамках данного подхода возможно построение многоуровневых моделей материалов с явным учетом структуры и механизмов деформирования на различных масштабных уровнях [1].

Предложены геометрически и физически нелинейные многоуровневые модели поликристаллических металлов и сплавов, учитывающие ключевые механизмы неупругого деформирования: внутризеренное дислокационное скольжение, развороты кристаллических решеток зерен (в том числе за счет несовместности движения дислокаций в соседних зернах), лидирующее при сверхпластическом деформировании и переходе к нему зернограничное скольжение и аккомодационные механизмы, сопровождающие его – зернограничную диффузию и динамическую рекристаллизацию. При формулировке соотношений мезоуровня (уровня кристаллитов) используется введенная подвижная система координат, определяющая квазитвердое движение и коротационную производную, которая связывается с симметричными элементами [1]. Получены аналитические и численные оценки сопоставления различных соотношений мезоуровня: определяющих соотношений, сформулированных в актуальной, разгруженной и вводимой в предложенном подходе решеточной разгруженной конфигурации, а также уравнений для спина решетки; показана близость некоторых формулировок [1]. Трехуровневая модель, способная описать деформирование в режиме структурной сверхпластичности и переходы к нему [1, 2], учитывает взаимодействие механизмов зернограничного и внутризеренного скольжения между собой и с аккомодационными процессами при деформировании; при определении коротационной производной мезоуровня принимается во внимание дополнительный спин при реализации зернограничного скольжения.

Проведено значительное количество численных экспериментов по определению на различных масштабных уровнях изменяющихся характеристик напряженно-деформированного состояния и параметров, характеризующих структуру, для различных видов нагружений (простых и сложных, при разных температурах и скоростях деформации) образцов из некоторых металлов и сплавов. Полученные результаты согласуются с известными экспериментальными данными.

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

Литература

1. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.

2. Трусов П. В., Шарифуллина Э. Р., Швейкин А. И. Многоуровневая модель для описания пластического и сверхпластического деформирования поликристаллических материалов // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22 (2). – С. 5–23.

МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОНСТИТУТИВНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ: СТРУКТУРА, ВОЗМОЖНОСТИ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Трусов П. В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский пр., Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Математическое моделирование в последние десятилетия превратилось в основной инструмент для разработки технологических процессов обработки металлов и сплавов. Центральным элементом моделей являются определяющие соотношения (или конститутивная модель материала). В качестве последних в отечественной практике преобладают феноменологические континуальные модели (теории пластичности, ползучести и т.д.), оперирующие макропараметрами (напряжениями, деформациями), требующие для идентификации и верификации значительного объема макроэкспериментов (вообще говоря – на сложное нагружение). В последние 10–15 лет для исследования процессов неупругого деформирования все более интенсивно применяются многоуровневые модели, основанные на введении внутренних переменных и физических теориях упругопластичности (упруговязкопластичности) [1]. В моделях этого класса используется явное описание структуры материала, физических механизмов и их носителей на различных структурно-масштабных уровнях. Построение многоуровневых моделей на основе описания физики процесса делает их весьма универсальными, пригодными для разработки функциональных материалов и изделий из них.

Представлена структура многоуровневой модели, предназначенной для описания поведения поликристаллических материалов при термомеханических воздействиях [1]. Поскольку процессы обработки металлов и сплавов сопряжены с интенсивным неупругим деформированием, значительное внимание уделено рассмотрению разложения движения на квазитвердое и деформационное. С этой целью на уровне кристаллита вводится жесткая подвижная система координат, связанная с кристаллографической осью и кристаллографической плоскостью [1]. Предложено мультипликативное разложение градиента места на уровне кристаллита, в котором явным образом выделены ротация жесткой подвижной системы координат и искажение решетки [1, 2]. Введенное разложение позволяет учесть симметрию кристаллитов и эволюционирующие симметричные свойства представительного макрообъема поликристалла. Приведена классификация уравнений и внутренних переменных различных структурно-масштабных уровней. Рассмотрены основные соотношения на различных уровнях, отмечается возможность модифицировать, «доставать» модель, вводя новые физические механизмы и уравнения для описания их реализации. Приведены примеры применения модели для описания процессов пластического и сверхпластического деформирования [1], рекристаллизации и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект № 0751-2020-0027).

Литература

1. Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН. – 2019. – 605 с.
2. 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.

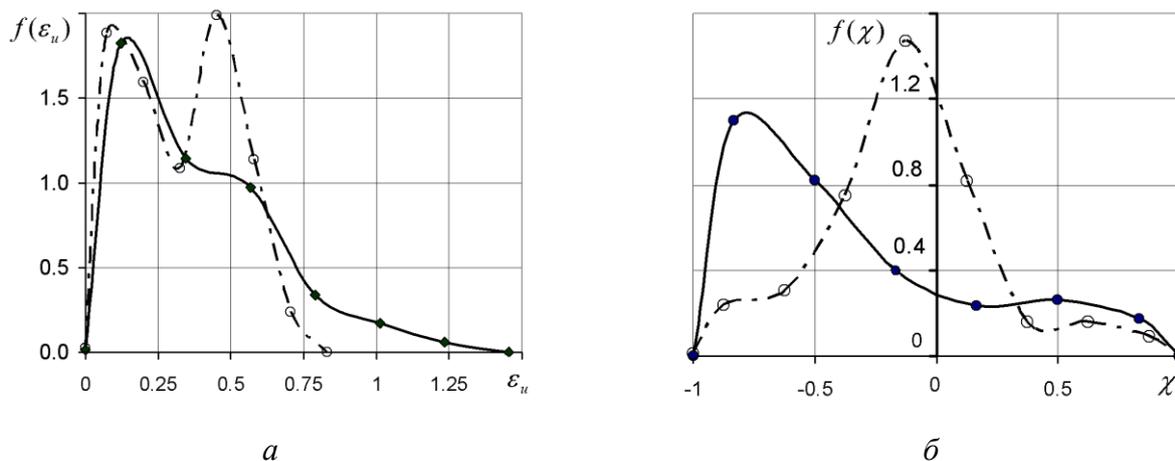
ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ПЛОСКОСТИ ПРОКАТКИ И НА БОКОВЫХ КРОМКАХ ПОЛОСЫ

Реков А. М.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Институт материаловедения и металлургии,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: arekov@yandex.ru

Практика листовой прокатки показала, что процесс разрушения металла начинается на кромках полосы. При этом в плоскости прокатки целостность металла, как правило, не нарушается. Представляет практический и научный интерес получить количественную оценку различия деформированного состояния на указанных поверхностях. Методом делительных сеток определено деформированное состояние в плоскости прокатки и на боковых гранях полосы из электротехнического алюминия [1–2]. В пределах каждой ячейки, размером $0,5 \times 0,5$ мм, примерно 10–11 зерен. Это приводит к не совсем полному усреднению свойств материала образца в пределах ячейки делительной сетки. Деформированное состояние полосы в очаге деформации оценивали величиной интенсивности пластических деформаций и параметром Надаи-Лоде. Испытания проведены при прокатке на стане ДУО-120 образца прямоугольной формы. Размеры сечения образца (50×5 мм) соответствуют условиям прокатки тонких широких полос.

Плотности распределения интенсивности деформаций являются бимодальными (соответствуют зонам отставания и опережения при прокатке). Максимальные величины интенсивности деформаций на кромках полосы примерно в два раза выше, чем в плоскости прокатки (рисунок а). При этом плотности распределения параметра Надаи-Лоде для кромок полосы соответствует одноосному растяжению, а в плоскости прокатки – чистому сдвигу (рисунок б).



Результат эксперимента: а – плотность интенсивности деформаций в очаге прокатки; б – Распределения параметра Надаи-Лоде в очаге деформации полосы (сплошная линия на кромках полосы, штрихпунктирная – в плоскости прокатки)

Выводы

1. Представлен сравнительный анализ плотностей распределения интенсивности главных деформаций и деформированного состояния в плоскости прокатки и на кромках полосы в очаге деформации.
2. Результаты работы могут быть использованы в качестве дополнительных критериев при анализе деформационных процессов и разрушения металла при прокатке полос.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-08-01011.

Литература

1. Вайнштейн А. А., Алехин А. Н. Основы теории упругости и пластичности с учетом неоднородности материала. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. техн. ун-та, 2004. – 236 с.
2. Реков А. М. Функции распределения напряженно-деформированных состояний микроструктуры поликристаллов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80 (2). – С. 26–31.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ

Швейкин А. И.^{а)}, Трусов П. В.^{б)}, Романов К. А.^{в)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, пр. Комсомольский, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}shveykin@pstu.ru; ^{б)}tpv@matmod.pstu.ac.ru; ^{в)}k.a.kriv@mail.ru*

В последнее время наибольшую популярность к описанию поведения материалов получил многоуровневый подход, основанный на физических теориях пластичности [1], позволяющий описывать изменение структуры материала и определяемых ее состоянием эффективных физико-механических свойств, что актуально для определения путей совершенствования существующих и разработки новых методов термомеханической обработки. В частности, коллективом, в который входят авторы, к настоящему времени предложен ряд моделей, включающих описание структуры материала и значимых механизмов неупругого деформирования [1]. Стоит отметить, что важным элементом анализа «качества» нелинейных моделей материалов указанного класса является исследование их устойчивости.

Целесообразным является анализ влияния отклонения параметров, характеризующих свойства моделируемого объекта, на изменение отклика (анализ чувствительности к возмущениям параметров модели). Актуальность такого исследования для моделей материалов обусловлена стохастичностью большинства характеристик материала, в связи с чем применяемые в технологических расчетах конститутивные математические модели должны быть устойчивы по отношению к изменению материальных параметров, что позволяет исключить необходимость проведения для каждого частного случая точной экспериментальной идентификации свойств материала конкретного изделия. Была предложена методика оценки чувствительности [2] разработанных моделей многоуровневых моделей материалов [1] к возмущениям параметров, основанная на интегральном сопоставлении историй откликов, получаемых при использовании возмущенных и невозмущенных наборов параметров, для нескольких видов нагружений. Под возмущаемыми параметрами в широком смысле понимаются как постоянные, входящие в конститутивные уравнения (упругие модули, показатель скоростной чувствительности в вязкопластическом законе и др.), так и начальные значения внутренних переменных (критических напряжений сдвигов, исходных ориентировок кристаллитов и др.).

Полезным также представляется анализ влияния возмущения исходного решения в некоторые (отличные от начального) моменты времени на получаемую в дальнейшем историю изменения отклика. Указанная выше методика [2] была обобщена для рассмотрения указанного типа возмущений; в качестве возмущаемых переменных были рассмотрены накопленные сдвиги по системам внутризеренного скольжения дислокаций и критические напряжения сдвигов.

Результаты проведенных численных расчетов с использованием указанных методик свидетельствуют об устойчивости разработанных многоуровневых моделей материалов [1] к возмущениям рассмотренных типов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-31-70027) и Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект № 0751-2020-0027).

Литература

1. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.
2. Об оценке чувствительности статистических многоуровневых моделей поликристаллических металлов к возмущениям параметров / А. И. Швейкин, Э. Р. Шарифуллина, П. В. Трусов, Д. А. Пушков // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11 (2). – С. 214–231.

ОЦЕНКА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА МУЖЧИН С НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ МЕТОДОМ РИТМОКАРДИОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Акимова А. В., Миронов В. А., Федотовская К. И., Вихарева Е. В., Десятова А. В.

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

Цель работы: оценить вариабельность сердечного ритма молодых мужчин с недифференцированной дисплазией соединительной ткани методом ритмокардиографии.

Материал и методы. Обследовано 111 мужчин с медианой возраста 20 (19 ÷ 21) г. Определяли внешние признаки НДСТ на основании Национальных рекомендаций Российского научного медицинского общества терапевтов 2015 г. При выявлении 6 и более внешних фенов обследуемого включали в группу НДСТ (n = 65), менее 6 фенов (n = 46) – в группу контроля. Оценен индекс гипермобильности суставов Бейтона, симптомы вовлечения соединительной ткани согласно Гентским критериям, антропометрические показатели с расчетом индекса массы тела (ИМТ). Проведена эхокардиография. Группы по возрасту не различались (p = 0,9). Исследовали вариабельность сердечного ритма (ВСР) методом ритмокардиографии высокого разрешения (РКГ) с помощью аппаратно-программного комплекса – КАП-РК-01-«Микор». Показатели статистического анализа: медианы (25 ÷ 75 %) продолжительности RR-интервалов РКГ в секундах, стандартная девиация всех волн от средней величины RR, среднеквадратические отклонения каждого вида флюктуаций: гуморально-метаболического (σ_1), симпатического (σ_m), парасимпатического (y_s) 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 покое, маневр Вальсальвы–Бюркера, проба Ашнера–Даньини, активная ортопроба, проба с физической нагрузкой, проба ШеллонгаII.

Статистическую значимость полученных результатов оценивали с помощью критериев Манна–Уитни и χ^2 . Различия достоверны при p < 0,05.

Результаты. НДСТ с 6 и более внешними признаками выявлена у 58,5 % обследованных. В группе НДСТ достоверно чаще встречаются малые аномалии сердца (p = 0,000), преимущественно, пролапс митрального клапана и аномально расположенные хорды левого желудочка. Мужчины с НДСТ имели более высокий рост (p = 0,01) и размах рук (p = 0,000) и более низкие значения ИМТ (p = 0,007), что вероятнее всего связано с астенической конституцией. Они также набрали больше баллов по индексу Бейтона (p = 0,008) и Гентским критериям (p = 0,000). По данным РКГ группы значимо не отличались по значениям межсистолических интервалов (p = 0,11), в фоновой регистрации РКГ различий исследуемых показателей не выявлено. Однако после маневра Вальсальвы–Бюркера группа НДСТ показала более высокие значения ARA (p = 0,05) и σ_s (p = 0,07). Подобная тенденция была зарегистрирована и после пробы Ашнера–Даньини (p = 0,08; p = 0,05). После пробы с физической нагрузкой мужчины с НДСТ показали достоверное увеличение SDNN (p = 0,022), ARA (p = 0,005) и σ_s (p = 0,008) и достоверно отличались более продолжительным периодом стимуляции в активной ортопробе (p = 0,03).

Выводы:

1. НДСТ среди обследованных молодых мужчин выявлена у 58,5 %.
2. НДСТ ассоциируется с более высоким ростом, размахом рук, низким индексом массы тела, гипермобильностью суставов, наличием малых аномалий сердца.
3. Среди мужчин с НДСТ повышено вагусное влияние на регуляцию сердечного ритма.
4. Метод РКГ высокого разрешения способен выявить особенности регуляции сердечного ритма лиц с НДСТ, которые не определяются другими методами диагностики.

НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ДИСПЛАЗИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ КАК ФАКТОР РИСКА ПЕРЕЛОМОВ У МОЛОДЫХ МУЖЧИН

Акимова А. В., Миронов В. А., Попов А. А., Палабугина П. А., Федотовская К. И.

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

Дисплазия соединительной ткани (ДСТ), встречающаяся по разным данным у 30–70 % молодых людей, может затрагивать многие органы и системы, в том числе и костную, вызывая остеопатию и остеопороз. Дефицит магния, ассоциированный с ДСТ, также может вносить вклад в снижение минеральной плотности костной ткани (МПКТ), способствовать снижению мышечного тонуса и астенизации.

Цель работы – оценить связь числа переломов как проявления снижения минеральной плотности кости и дефицита магния с признаками ДСТ у молодых мужчин.

Материал и методы. Обследовано 144 мужчины от 18 до 25 лет. Определяли внешние признаки ДСТ согласно Национальным рекомендациям 2015 г. При выявлении 6 и более признаков наследственных нарушений соединительной ткани обследуемого включали в группу недифференцированной ДСТ (НДСТ). Проводили терапевтический осмотр с оценкой антропометрических показателей и расчетом индекса массы тела. Проводили функциональные тесты с расчетом индекса гипермобильности Бейтона. Выясняли количество переломов в анамнезе. Для выявления симптомов дефицита магния использовался опросник, разработанный РСЦ Института микроэлементов ЮНЕСКО. Полученный по опроснику результат 18 и более баллов свидетельствовал о вероятном дефиците магния.

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программы «Statistica 6.0» с использованием коэффициента корреляции Спирмена (r), критерия χ^2 . Различия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты. Среди обследованных молодых людей ($n = 144$) с медианой возраста 20 (18–23) лет ДСТ была выявлена у 68,8 %. Все случаи были отнесены к НДСТ, синдромных форм на основании Гентских и Вильфраншских критериев выявлено не было. Группа лиц без переломов составила 92 чел., из них 62 чел. (67,4 %) были включены в группу НДСТ. Один перелом в течение жизни был у 24 чел., из них 17 чел. (70,8 %) имели НДСТ. В группу лиц с множественными переломами вошли 27 молодых людей, среди которых у 20 была выявлена НДСТ (74,1 %). Выявленные различия, оцененные с помощью критерия χ^2 , не достигли статистически значимого уровня ($p > 0,05$).

Выявлена слабая положительная корреляция количества переломов у молодых мужчин с числом внешних фенов ДСТ ($r = 0,167$; $p = 0,044$); выраженная положительная корреляция с числом признаков ДСТ, включающих наиболее значимые внешние и внутренние феновы (0,255; $p = 0,002$); умеренная положительная корреляция с индексом гипермобильности суставов Бейтона (0,258; $p = 0,018$), а также слабая положительная корреляция переломов с баллами по опроснику дефицита магния (0,18; $p = 0,047$).

Таким образом, молодым людям с множественными значимыми признаками ДСТ, включающими проявления гипермобильности суставов, необходимо рассмотреть показания для проведения рентгеновской денситометрии поясничного отдела позвоночника и/или шейки бедренной кости для своевременного выявления возможного снижения МПКТ и профилактики переломов при минимальном уровне травмы, а также принять меры для профилактики магниевого дефицита.

Выводы:

1. Переломы в анамнезе чаще выявлялись у лиц с множественными внешними признаками ДСТ.
2. Выявлена сильная положительная корреляция числа переломов у молодых людей с числом признаков наследственных нарушений соединительной ткани и выраженностью гипермобильности суставов по Бейтону.
3. Отмечена слабая положительная корреляция количества переломов в анамнезе с баллами, полученными по опроснику дефицита магния.

ПСИХОВЕГЕТАТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОЛОДЫХ МУЖЧИН С НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

Акимова А. В., Миронов В. А., Лях В. Д., Гагиев В. В., Лягаева А. Г.

*ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» МЗ РФ,
д. 3, ул. Репина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация
ФГКУЗ «5 военный клинический госпиталь войск национальной гвардии РФ»
д. 10, ул. Соболева, г. Екатеринбург, 620036, Российская Федерация,
e-mail: anna_v_akimova@mail.ru*

Цель работы – выявить психовегетативные особенности молодых мужчин с недифференцированной дисплазией соединительной ткани (НДСТ).

Материалы и методы. В исследование включили 111 молодых мужчин, не имеющих на момент обследования острых заболеваний и обострения хронической патологии. На первом этапе проведено одномоментное исследование, включающее стандартный терапевтический осмотр. Внешние признаки дисплазии соединительной ткани (ДСТ) и малые аномалии развития ($n = 48$) оценивались в соответствии с Национальными рекомендациями Российского научного медицинского общества терапевтов 2015 г. Испытуемые заполняли опросник Вейна для выявления вегетативных нарушений, исследователи выявляли критерии исходного вегетативного тонуса (А.М. Вейн, 2003). Оценку психоэмоционального состояния проводили с помощью госпитальной шкалы тревоги и депрессии (HADS), многостороннее исследование личности (МИЛ) – с помощью Миннесотского многоаспектного личностного опросника (ММРП) в модификации Ф.Б. Березина. Для определения субъективного ощущения боли применяли визуальную аналоговую шкалу боли, для экспресс-диагностики астении – шкалу астенического состояния (Л.Д. Майкова, Т.Г. Чертова).

На втором этапе проводили сравнительное исследование. Основную группу НДСТ составили мужчины, имеющие 6 и более внешних признаков ДСТ, у которых были исключены дифференцированные формы ($n = 65$), группу контроля – лица, имеющие менее 6 внешних признаков ($n = 46$).

Для оценки статистической достоверности различий использовали непараметрический критерий Манна–Уитни. Различия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты. При детальном осмотре внешние фены ДСТ или малые аномалии развития были выявлены у каждого. НДСТ зарегистрирована у 65 из 111 (58,6 %). Группы были сравнимы по возрасту ($p = 0,9$). При исследовании исходного вегетативного тонуса мужчины с НДСТ показали достоверно большее число критериев как симпатического ($p = 0,016$), так и парасимпатического тонуса (0,005), набрали большее количество баллов по Опроснику Вейна ($p = 0,004$), но в большинстве случаев не достигли диагностического порога синдрома вегетативной дисфункции. Группа НДСТ продемонстрировала достоверно более выраженные боли в суставах ($p = 0,007$), в спине ($p = 0,000$), и симптомы астении ($p = 0,005$).

Мужчины группы НДСТ показали достоверно больше баллов по подшкале тревоги HADS ($p = 0,005$), по признакам депрессии различий не выявлено ($p = 0,33$). Данные скрининга были подтверждены результатами МИЛ: в группе НДСТ достоверно больше баллов по шкале тревоги ($p = 0,03$), а также тенденция к более высоким проявлениям ипохондрии ($p = 0,055$) и паранойяльности ($p = 0,07$).

Выводы:

1. Мужчины с НДСТ имеют достоверно больше клинических симптомов вегетативных нарушений, преобладание критериев исходного симпатического и в большей степени – парасимпатического тонуса.

2. Выраженность болевых синдромов в суставах и спине была выше у мужчин с НДСТ.

3. Группа НДСТ показала достоверно большую выраженность тревоги по шкалам тревоги HADS ($p = 0,005$) и МИЛ ($p = 0,03$), более выраженные симптомы ипохондрии ($p = 0,055$) и астении ($p = 0,005$).

СИНДРОМ СТАРЧЕСКОЙ АСТЕНИИ И СОПУТСТВУЮЩАЯ ПАТОЛОГИЯ У ПАЦИЕНТОВ ГЕРИАТРИЧЕСКОГО СТАЦИОНАРА

Акимова А. В., Бухалова О. В., Вознюк Н. В., Фридман Е. А., Черепанова Н. М.

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

Синдром старческой астении (ССА) – ассоциированный с пожилым и старческим возрастом синдром, сопровождающийся инволютивными процессами на фоне полиморбидности, ведущий к снижению физиологического и психологического потенциала организма. Оценивается слабость, немотивированная потеря массы тела, снижение физической активности, динамометрическое снижение силы кисти. При наличии трех и более критериев выставляют ССА, при наличии одного – преастению. Цель исследования – оценка клинических характеристик, проявлений ССА и сопутствующей патологии.

Материалы и методы. Обследовали 50 пациентов гериатрического стационара ЦГБ № 3 г. Екатеринбурга в возрасте 66–101 год. Проведен сбор жалоб, анамнеза, анкетирование по визуальной аналоговой шкале боли, краткой шкале оценки психического статуса MMSE, госпитальной шкале тревоги и депрессии HADS, шкале астении Майковой, опроснику «Возраст не помеха», шкале выраженности одышки mMRC. Оценен риск 10-летней вероятности переломов шейки бедра по FRAX с помощью онлайн калькулятора, прогноз 10-летней выживаемости по индексу коморбидности Charlson. Статистически различия групп по количественному признаку оценивали с помощью критерия Манна-Уитни, корреляции – с помощью коэффициента Спирмена. Различия достоверны при $p < 0,05$.

Результаты. Среди 50 пациентов с медианой возраста 80 (74 ÷ 83) лет – 39 женщин (78 %) и 11 мужчин (22 %). Женщины показали более высокие баллы астении по шкале Майковой ($p = 0,018$) и по шкале депрессии HADS ($p = 0,08$). По шкале MMSE у большей части пациентов выявлена деменция легкой степени. 10-летняя вероятность перелома шейки бедра по FRAX достоверно выше у женщин ($p = 0,001$). Отмечается положительная связь показателей синдром старческой астении и возраста ($r = 0,28$, $p = 0,041$). Выявлена сильная связь выраженности старческой астении и тяжести одышки ($r = 0,34$; $p = 0,001$). Структура сопутствующей патологии: 100 % пациентов – гипертоническая болезнь, 96 % – хроническая сердечная недостаточность, 64 % – ишемическая болезнь сердца, 92 % – остеоартрит, 58 % – патология желудочно-кишечного тракта, 24 % – сахарный диабет 2 типа, 22 % – дислипидемия, 20 % – ХОБЛ, 16 % – бронхиальная астма, 6 % – гипотиреоз. Выявлена положительная связь индекса коморбидности и 10-летнего риска смерти. Баллы ССА находятся в положительной связи с баллами астении Майковой ($r = 0,41$; $p = 0,002$) и симптомами депрессии ($r = 0,27$; $p = 0,05$). Выявлена корреляция 10-летнего риска перелома шейки бедра с выраженностью ССА ($r = 0,36$; $p = 0,012$). Вероятность перелома шейки бедра связана с возрастом ($r = 0,52$; $p = 0,000$), выраженностью астении ($r = 0,39$; $p = 0,005$), тяжестью одышки ($r = 0,46$; $p = 0,001$) и наличием переломов в анамнезе ($r = 0,38$; $p = 0,008$), и находится в обратной корреляционной зависимости от роста ($r = -0,43$; $p = 0,002$) и массы тела ($r = -0,44$; $p = 0,001$). Одышка ведет к гипомобильности, прогрессированию саркопении и повышенному риску развития остеопороза. Баллы по шкале «Возраст не помеха» коррелируют с риском переломов ($r = 0,36$; $p = 0,012$). Чем больше переломов в анамнезе, тем ниже регенераторный потенциал костной ткани и выше риск вторичного остеопороза. Гормональный дисбаланс снижает анаболическое действие на костную ткань.

Выводы. Женщины имели более выраженные артралгии, проявления астении и более высокий 10-летний риск перелома шейки бедренной кости. Риск переломов взаимосвязан с возрастом, выраженностью астении, переломами в анамнезе, низким ростом и весом. Выраженность ССА коррелирует с возрастом, тяжестью одышки, депрессии и повышенным риском перелома шейки бедра. Все пациенты со старческой астенией имели патологию сердечно-сосудистой системы, а также в большинстве случаев поражение опорно-двигательного аппарата и органов пищеварения.

БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

Балина О. В.^{а)}, Нассонов В. В.^{б)}

*Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}balinaov@tyuiu.ru; ^{б)}nassonovvv@tyuiu.ru*

При диагностике состояния коррозионных повреждений объектов нефтегазового комплекса в ряде случаев необходимы системы дистанционного контроля толщины стенки без нарушения изоляции и ручного или механического сканирования поверхности. Толщинометрия через немагнитную изоляцию возможна при использовании электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей, однако необходима оценка погрешности за счет анизотропии свойств материала, включая величину механических напряжений, непараллельности внутренней и наружной стенок при язвенной коррозии и длинных линий связи между ЭМА-преобразователями и измерительным прибором. Кроме того, стоимость матрицы ЭМА-преобразователей с прибором часто сопоставима со стоимостью контролируемого объекта [1].

В литературе описан опыт использования коэрцитивной для послойного контроля изделий после цементации [2, 3] и в качестве помехи при оценке эксплуатационных повреждений грузоподъемных устройств влияние толщины изделия на коэрцитивную силу [4].

В ходе эксперимента, варьируя режимами намагничивания и размерами П-образного сердечника, достигнута максимальная чувствительность коэрцитивной силы к изменению толщины в определенном диапазоне. Например, для низколегированных сталей типа 09Г2С возможно измерение толщин от 1 до 9 мм с относительной погрешностью 5 % при немагнитной изоляции 2 мм. При этом измеряется не средняя, а близкая к минимальной толщина стенки контролируемого объекта между полюсами датчика.

Значительным мешающим фактором является величина механических напряжений в контролируемом материале. При одноосном растяжении образца из стали 09Г2С до 0,6 предела текучести величина коэрцитивной силы меняется в 1,4 раза, что эквивалентно утонению ненагруженного образца от 8 до 5 мм. Для уменьшения влияния данного фактора необходимо выбирать направление установки датчика для толщинометрии с учетом направления действия напряжений или устанавливать еще один датчик для измерения напряжений, нечувствительный к изменению толщины. Для уменьшения погрешности измерения необходимо оценивать величину напряжений в долях от предела текучести материала и использовать зависимость соотношения коэрцитивной силы вдоль и поперек действия нагрузки [5–7].

Литература

1. Алехин С. Г. Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. – Москва, ЗАО «НИИИМ МНПО «СПЕКТР», 2013. – 21 с.
2. Михеев М. Н. Магнитный метод контроля толщины закаленных, цементированных азотированных и обезуглероженных слоев на стальных изделиях // Изв. АН СССР (ОТН). – 1943. – № 5–6. – С. 53–68.
3. Горкунов Э. С., Лапидус Б. М. Магнитные свойства двухслойных ферромагнетиков применительно к контролю качества поверхностно упрочненных изделий // Структурно-фазовые превращения в металлах: проблемы прочности и пластичности : сборник. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1987. – С. 103–110.
4. Forecasting the remaining available resource of the metallic bearing structure of the bridge cranes used over the standard operating time / O. V. Grigorov, S. A. Gubskiy, V. V. Strijak, D. A. Ivchenko, A. A. Borisenko // Annals of the University of Petrosani, Mechanical Engineering. – 2008. – No. 10. – P. 59–72.

5. Экспериментальная проверка определения механических напряжений магнитным методом на трубном стенде из высокопрочной стали / А. В. Елфимов, А. В. Сальников, И. Н. Бирилло, А. С. Кузьбожев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 3 (105). – С. 103–109.
6. Измерение напряжений в стали с помощью коэрцитиметра / В. Ф. Новиков, М. С. Бахарев, В. В. Нассонов и др. // Нефть и газ. – 2005. – № 2. – С. 89–94.
7. Определение механических напряжений в сталях по результатам измерений их магнитных характеристик / Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, С. Ю. Митропольская, Д. И. Вичужанин // Вестник научно-технического развития. – 2010. – Т. 35 (3). – С. 21–25. – URL: www.vntr.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО ВОЛЛАСТОНИТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВМПЭ

Данилова С. Н.¹, Охлопкова А. А.¹, Ярусова С. Б.², Гордиенко П. С.²,
Буравлев И. Ю.², Игнатъева Е. Г.¹

¹ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
д. 48, ул. Кулаковского, г. Якутск, 677013, Российская Федерация,
e-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

²ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук»,
д. 159 Д, пр. 100-летия Владивостока, г. Владивосток, 690022, Российская Федерация,
e-mail: yarusova_10@mail.ru

В последнее десятилетие наиболее часто проводятся исследования в триботехническом материаловедении связанные с созданием износостойких материалов и покрытий, математическим моделированием процессов трения и изнашивания, а также установлением закономерностей трибологического поведения полимеров и композитов при внешних воздействиях [1]. Применение волластонита в качестве наполнителя в полимерных композиционных материалах (ПКМ) связано с его армирующим действием на полимерную матрицу. Высокое соотношение длины к диаметру зерен игольчатого волластонита обеспечивает лучшую передачу напряжения при воздействии внешней нагрузки, что приводит к увеличению механических и триботехнических свойств материалов [2–5].

Цель работы – изучение влияния синтетического волластонита, полученного при автоклавном синтезе (220 °С) в многокомпонентной системе $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} - \text{KOH} - \text{H}_2\text{O}$ [6], на физико-механические и триботехнические характеристики ПКМ на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ).

В качестве полимерной матрицы использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) марки GUR-4022 (Celanese, Китай), с молекулярной массой $5,3 \times 10^6$ г/моль. Композиты получали методом горячего прессования. Для более равномерного распределения наполнителя в полимерной матрице использовали механоактивацию волластонита в планетарной мельнице Активатор 2S (Россия) в течение 2 мин (3000 об/мин). Физико-механические свойства ПКМ исследовали согласно ГОСТ 11262-80 на универсальной разрывной машине «Autograph AGS-J» (Shimadzu, Япония). Триботехнические характеристики ПКМ определяли на трибометере UMT-3 (CETR, США).

Анализ результатов показал, что введение активированного волластонита в СВМПЭ способствует увеличению механических показателей при малых содержаниях наполнителя. Установлено, что происходит повышение прочности при растяжении ПКМ на 26 %, модуля упругости – на 22 % и износостойкости на 67 % по сравнению с исходным полимером. Таким образом, показана эффективность метода механоактивации волластонита для улучшения механических характеристик ПКМ, предназначенных для узлов трения машин и механизмов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-50117 и МНУВО РФ НИР № FSRG-2020-0017.

Литература

1. Свириденко А. И. 35 лет коллективных исследований на страницах журнала «Трение и износ» // ПОЛИКОМТРИБ–2015 : тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, 2015. – С. 10.
2. Evaluation of mechanical and thermal properties of Poly (butylene terephthalate)(PBT) composites reinforced with wollastonite / G. S. Deshmukh, D. R. Peshwe, S. U. Pathak, J. D. Ekhe // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2011. – Vol. 64 (1–2). – P. 127–132.

3. Amarababu B., Rangadu V. P. Synthesis and Characterization of Mineral Wollastonite Particulate Filled Vinyl-Ester Resin Composites // *International Letters of Chemistry*. – 2014. – Vol. 18. – P. 91–102.
4. Wollastonite-reinforced polypropylene composites modified with novel metallocene EPR copolymers. II. Mechanical properties and adhesion / I. Љvab, V. Musil, A. Pustak, I. Љmit // *Polymer composites*. – 2009. – Vol. 30 (8). – P. 1091–1097.
5. Mechanical properties of wollastonite reinforced thermoplastic composites: A review / J. X. Chan, J. F. Wong, A. Hassan, Z. Mohamad, N. Othman // *Polymer Composites*. – 2019. – Vol. 41. – P. 395–429.
6. Влияние условий синтеза на особенности формирования силикатов кальция в различных многокомпонентных системах / С. Б. Ярусова, П. С. Гордиенко, А. А. Охлопкова, С. Н. Данилова, В. Е. Силантьев, И. Ю. Буравлев, И. Г. Жевтун, Д. В. Достовалов, Е. В. Пашнина // *Химическая технология*. – 2019. – Т. 20 (14). – С. 661–666.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЮ

Смирнов С. В.¹, Коновалов Д. А.¹, Веретенникова И. А.¹, Мичуров Н. С.¹, Пестов А. В.²

¹Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: satterkein@yandex.ru

²Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН,
д. 22, Софьи Ковалевской, Екатеринбург, 620137, Российская Федерация

Достаточно часто поверхности, на которые наносятся защитные эпоксидные покрытия испытывают в процессе эксплуатации многократные климатические нагрузки от воздействия переменного температурного поля. Основная цель работы – исследование влияния циклического переменного температурного поля на механические характеристики эпоксидных покрытий.

В работе рассматривали три покрытия на основе эпоксидной смолы ЭД-20, обозначенными КХО-1 (ЭД-20/отвердитель ПЭПА = 10/1), КХО-2 (ЭД-20/отвердитель Л-20 = 10/3), КХО-2Г (ЭД-20/отвердитель Л-20 = 10/1). Смеси были нанесены на алюминиевые пластины толщиной 2 мм с одинаковой шероховатостью. Полимеризация составов КХО-1 и КХО-2 происходила при температуре 23 °С в течение 24 ч, а КХО-2Г – при температуре 70 °С в течение 48 ч. Технология термоциклирования выбрана в соответствии с ГОСТ 27037-86. Образцы помещали в сушильный шкаф и выдерживали при температуре (60±2) °С в течение 1 ч, затем образцы переносили в камеру холода (время перемещения не более 2 мин) и выдерживали при температуре минус (40±2) °С в течение 1 ч. Далее образцы извлекали из камеры холода и выдерживали при температуре (23±5) °С в течение 15 мин. Цикл повторяли 20 раз. Эксперименты по инструментальному индентированию проведены на комплексе NanoTriboindenter TI 950. Определяли свойства покрытий до и после термоциклирования. Оценивали влияние времени нагружения на получаемые значения твердости Н и приведенного модуля упругости E_r , а также ползучесть материалов покрытий.

Изначально три материала отличаются поведением при воздействии равной нагрузки и времени нагружения. Для КХО-1 и КХО-2Г значения твердости Н и модуля E_r при времени нагружения 5 с одинаковы и составляют 0,40 и 7 ГПа соответственно, далее с увеличением времени нагружения плавно уменьшаются до 0,38 и 6,2 ГПа при времени нагружения 80 с, причем эти уменьшения незначительны. Для третьего материала КХО-2 наблюдается резкое падение Н с 0,42 (при 5 с) до 0,3 (при 80 с) ГПа и E_r с 6,8 (при 5 с) до 5 (при 80 с) ГПа с увеличением времени нагружения. Циклическое воздействие температур приводит к снижению значений твердости и модуля упругости для всех трех материалов. После температурного воздействия для материала КХО-2Г при изменении времени нагружения больше не наблюдается резкого падения исследуемых характеристик, твердость при 5 с нагружения соответствует 0,28 ГПа, при 80 с – возрастает до 0,33 ГПа; в свою очередь модуль при варьировании времени нагружения остается без изменений и равняется 5,2 ГПа. Скорее всего это связано с окончанием процесса полимеризации при воздействии высоких температур. В качестве характеристики ползучести материала покрытия при заданном времени выдержки и величине постоянной испытательной нагрузки использовали значение относительного изменения глубины индентирования. Циклическое температурное воздействие не приводит к изменению качественного вида зависимости показателя ползучести от времени выдержки, однако при этом наблюдаются изменения числовых значений, проявляющиеся в увеличении значения показателя ползучести.

Эксперименты проведены в Центре коллективного пользования «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН (г. Екатеринбург). Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-19-00571). Температурная камера приобретена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-01154.

ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНО-ЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Борисов В. В.^{а)}, Денисов В. Н.^{б)}, Курилин С. П.^{в)}, Луферов В. С.^{г)}

¹ Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске,
д. 1, Энергетический пр., г. Смоленск, 214013, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}vbor67@mail.ru; ^{б)}dvalnik@mail.ru; ^{в)}sergkurilin@gmail.com; ^{г)}lyferov@yandex.ru

С появлением эксплуатационной диагностики [1, 2] стало возможным получать и анализировать информацию о состоянии действующего парка электрооборудования. Это позволяет специалистам не только вырабатывать проектировочные и технологические рекомендации по повышению надежности электрооборудования, но и давать управленческие рекомендации по его текущей эксплуатации. Вместе с тем, задачи эксплуатационной диагностики электромеханических систем (ЭМС) характеризуются большим количеством параметров, нестабильностью воздействия внешних факторов, неопределенностью и нечеткостью данных.

Далее представляем математическую модель ЭМС, анализируем ее векторное пространство и выделяем рабочую область векторного пространства – основной носитель диагностической информации [3, 4]. Тестирование рабочей области может быть произведено как путем соответствующих экспериментов с ЭМС, так и путем расчетов на математической модели. Тестирование сводится к получению откликов ЭМС на импульсные воздействия по трем направлениям x , y , z рабочей области векторного пространства. Отклики являются столбцами функциональной матрицы Грина, которая фиксирует информацию о текущем техническом состоянии ЭМС. Рассматривая математическую модель ЭМС как модель характерной эксплуатационной группы, следует констатировать, что ее параметры являются нечеткими множествами для фиксированной группы. Значения параметров для конкретных ЭМС зависят от интенсивности, условий и длительности эксплуатации, от способности конструкции ЭМС сохранять исходное состояние. Констатация нечеткости параметров позволяет классифицировать модель ЭМС как нечеткую модель определенной эксплуатационной группы ЭМС.

Для работы с математической моделью предложена разновидность нечетких когнитивно-логических моделей, позволяющая в условиях неопределенности повысить точность прогнозной оценки состояния сложных систем по сравнению с существующими подходами [5]. Повышение точности прогнозной оценки достигается за счет следующих условий: учета влияния взаимозависимых параметров ЭМС в условиях неопределенности; осуществления гибкой структурной и параметрической настройки моделей; возможности задания различной «глубины ретроспективы» для прогностической оценки состояния ЭМС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00283.

Литература

1. Kurilin S. P., Denisov V. N. The Development of Topological Diagnostic Methods of Asynchronous Electric Machines // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2018. – Iss. 6. – P. 214–221. – DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.214-221.
2. Scientific basis of methods for topological diagnostics of asynchronous electric machines / S. P. Kurilin, V. N. Denisov, A. S. Fedulov, M. I. Dli // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2053, iss. 1. – P. 030031-1–030031-5. – DOI: 10.1063/1.5084392.
3. A method for the operational diagnostics of induction motors / S. P. Kurilin, V. N. Denisov, M. I. Dli, and V. I. Bobkov // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2176. – P. 040008. – DOI: 10.1063/1.5135157.

4. Vector space as an area of the operation risks characteristics for asynchronous electric machines / S. P. Kurilin, V. N. Denisov, M. I Dli, V. I. Bobkov // *Journal of Physics: Conf. Series.* – 2019. – Vol. 1260. – P. 052017. – DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052017.
5. Борисов В. В., Луферов В. С. Сб. трудов XXI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара : ООО «Офорт», 2019. – С. 217–220.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Борисов В. В.^{а)}, Денисов В. Н.^{б)}, Курилин С. П.^{в)}, Черновалова М. В.^{г)}

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске,
д. 1, Энергетический пр., г. Смоленск, 214013, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}vbor67@mail.ru; ^{б)}dvalnik@mail.ru; ^{в)}sergkurilin@gmail.com; ^{г)}0208margarita@bk.ru

Задача повышения эксплуатационной эффективности действующего парка электро-механических систем (ЭМС) является актуальной, комплексной и междисциплинарной научно-технической задачей. В заявленную задачу в качестве структурных составляющих входят две разнонаправленные задачи – прогнозная и аналитическая. Однако применение существующих подходов и методов к анализу и прогнозной оценке состояния ЭМС ограничено вследствие большого числа анализируемых параметров и сложного характера взаимовлияния системных и внешних факторов в условиях неопределенности. Кроме того, решение аналитической и прогнозной задач, как правило, обособленно от выработки и обоснования мероприятий по обеспечению требуемого уровня эксплуатационной эффективности ЭМС.

В работе анализируются информационное наполнение прогнозной и аналитической задач эксплуатации ЭМС, выделены характерные эксплуатационные состояния ЭМС, описаны частные задачи и подходы к их решению методами математического моделирования. Ключевым звеном организации эффективной эксплуатации является регулярная эксплуатационная диагностика ЭМС, фиксирующая информацию о ее текущем техническом состоянии. К настоящему моменту разработана методология эксплуатационной диагностики, основанная на тестировании векторного пространства ЭМС [1–4] и обеспечивающая необходимую детальность информации.

Для обеспечения высоких показателей эксплуатационной эффективности, принимаемые проектно-конструкторские и технологические решения, а также эксплуатационные алгоритмы и требования необходимо увязывать с характером эксплуатации ЭМС отдельно по эксплуатационным группам электрооборудования. Их выработка может осуществляться на основе постоянной Арнольда.

Учитывая ограниченность существующих подходов и методов, в работе предложен оригинальный метод, позволяющий решить комплексную проблему интеллектуального анализа, прогнозной оценки состояния и обоснования мероприятий по обеспечению требуемого уровня эксплуатационной эффективности ЭМС в условиях неопределенности. В основе предлагаемого метода лежит предложенная в [5] разновидность гибридных нечетких когнитивно-логических моделей. Описаны структура модели, этапы и алгоритм применения метода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00283.

Литература

6. Kurilin S. P., Denisov V. N. The Development of Topological Diagnostic Methods of Asynchronous Electric Machines // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2018. – Iss. 6. – P. 214–221. – DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.214-221.
7. Scientific basis of methods for topological diagnostics of asynchronous electric machines / S. P. Kurilin, V. N. Denisov, A. S. Fedulov, M. I. Dli // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2053, iss. 1. – P. 030031-1–030031-5. – DOI: 10.1063/1.5084392.
8. A method for the operational diagnostics of induction motors / S. P. Kurilin, V. N. Denisov, M. I. Dli, and V. I. Bobkov // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2176. – P. 040008. – DOI: 10.1063/1.5135157.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ФОСФОРА В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА

Дли М. И.^{а)}, Пучков А. Ю.^{б)}, Лобанева Е. И.^{в)}, Черновалова М. В.^{г)}

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске,
д. 1, Энергетический проезд, г. Смоленск, 214013, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}midli@mail.ru; ^{б)}putchkov63@mail.ru; ^{в)}lobaneva94@mail.ru; ^{г)}0208margarita@bk.ru

Цель представленного исследования – разработка структуры алгоритма оценки состояния сложной химико-энерготехнологической системы (ХЭТС) по производству фосфора для определения возможности продления остаточного ресурса оборудования по окончании его нормативного паспортного срока службы. В основе алгоритма лежит совместное применение аппарата глубоких искусственных сверточных нейронных сетей (СНС) и методов нечеткой логики для агрегации результатов, получаемым по различным каналам поступления информации о состоянии ХЭТС и реализуемого в ней технологического процесса.

Сырьем для ХЭТС служат отходы апатит-нефелиновых руд горно-обогатительных комбинатов. Значительные объемы таких отходов вызывают крайне негативное воздействие на окружающую среду прилегающих территорий, поэтому их вторичная переработка всегда будет актуальна. В состав ХЭТС входят три крупных агрегата: гранулятор исходного сырья, обжиговая машина и рудно-термическая печь [1]. Существующие математические модели отдельных агрегатов получены в различных исследованиях и базируются на различных методологических и концептуальных предпосылках, допущениях, поэтому их совместное использование в задаче прогнозирования состояния и диагностики ХЭТС сталкивается с необходимостью согласования параметров моделей, а также приводит к значительному увеличению размерности общей модели. В этих условиях становится актуальной задача дополнения существующих математических моделей агрегатов инструментом, позволяющим находить удачные представления многомерных данных для классификации состояний ХЭТС в задаче прогноза ее ресурса [2].

Разработанный алгоритм прогнозирования ресурса ХЭТС включает две СНС, одна из которых выполняет классификацию состояния по данным контрольно-измерительной аппаратуры от реального объекта, а другая использует результатом математического моделирования [3]. Разность этих оценок учитывается при реализации нечеткого вывода на основе базы знаний, отражающей экспертные заключения по результатам диагностических процедур, и базы данных, содержащей технологическую информацию.

Апробация предложенной архитектуры решения задачи оценки состояния ХЭТС и прогноза ее ресурса проводилась с помощью программной реализации на языке Python с использованием библиотек машинного обучения Keras и TensorFlow. Получены результаты, подтверждающие работоспособность рассматриваемой архитектуры оценки состояния, что может служить основанием для ее использования в информационном контуре управления ХЭТС и обеспечить возможность проведения дополнительных аналитических процедур, в том числе диагностику оборудования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00425.

Литература

1. Computer modeling of the chemical-power engineering process of roasting of a moving multilayer mass of phosphorite pellets / V. P. Meshalkin, V. I. Bobkov, M. I. Dli, S. M. Khodchenko // *Doklady Chemistry*. – 2017. – Vol. 477 (2). – P. 282–285. – DOI: 10.1134/S0012500817120023.
2. Training of an artificial neural network in the diagnostic system of a technical object / S. Duer, K. Zajkowski, I. Plocha, R. Duer // *Neural Computing and Applications*. – 2013. – Vol. 22 (7–8). – P. 1581–1590. – DOI: 10.1007/s00521-012-1052-9.

3. Generalized Model for Engineering and Controlling a Complex Multistage Chemical Energotechnological System for Processing Apatite-Nepheline Ore Wastes / V. P. Meshalkin, A. Yu. Puchkov, M. I. Dli, V. I. Bobkov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2019. – Vol. 53 (4). – P. 463–471. – DOI: 10.1134/S0040579519040237.

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ КОНТАКТНОМ НАГРУЖЕНИИ ПОКРЫТИЯ ПГ-10К-01, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ГАЗОПОРОШКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Саврай Р. А.¹, Коган Л. Х.², Макаров А. В.^{1,2}, Соболева Н. Н.¹

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

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация

Износ- и коррозионностойкие сплавы на основе кобальта находят широкое применение для нанесения функциональных покрытий на поверхности стальных изделий благодаря высокой прочности, твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, тепло- и жаростойкости, и в условиях эксплуатации при повышенных температурах являются более предпочтительными, чем сплавы на основе никеля. В настоящее время используются кобальтовые сплавы различных систем легирования. При этом практически отсутствуют работы по исследованию возможности неразрушающего контроля структурного состояния и свойств покрытий из сплавов на основе Co–Ni–Cr. Одной из важных характеристик, определяющей качество функциональных покрытий, является способность выдерживать контактные нагрузки. Поэтому актуальными задачами являются изучение контактной выносливости и разработка способов неразрушающего контроля усталостной деградации таких покрытий. Цель настоящей работы – изучение возможности использования вихретокового метода для контроля усталостной деградации при контактном нагружении полученного методом газопорошковой лазерной наплавки кобальтхромоникелевого покрытия ПГ-10К-01 (в мас. %: 1,45 С; 22,6 Cr; 31,8 Ni; 1,2 Fe; 1,1 Si; 1,6 В; 4,1 W; ост. Со). Механические испытания на контактную усталость проводили по схеме пульсирующего неударного контакта «шар–плоскость» на базе $N = 10^6$ циклов нагружения. Измерения электромагнитных параметров выполняли на лабораторном макете вихретокового прибора с использованием дифференциально включенных накладных трансформаторных вихретоковых преобразователей с выступающим стержневым ферритовым сердечником на частотах $f = 36, 72, 96$ и 120 кГц.

Установлена возможность контроля вихретоковым методом усталостной деградации при контактном нагружении наплавленного лазером покрытия ПГ-10К-01. Контроль вихретоковым методом усталостной деградации при контактном нагружении покрытия ПГ-10К-01 имеет определенные ограничения вследствие немонотонного изменения показаний вихретокового прибора b от числа циклов нагружения. При этом с одной стороны, возможен контроль резкого роста размера контактных повреждений, который при данных условиях нагружения происходит при 5×10^4 и 5×10^5 циклов и обусловлен образованием большого количества периферийных кольцевых трещин в зоне разрушения и соответствующим снижением показаний вихретокового прибора b вследствие роста удельного электросопротивления покрытия. С другой стороны, возможен контроль достижения определенного числа циклов нагружения в диапазоне $8 \times 10^5 - 1 \times 10^6$, когда показания вихретокового прибора b превысят исходные значения. Данный рост величины b обусловлен уплотнением покрытия в результате залечивания несплошностей и уменьшением его удельного электрического сопротивления. Контроль 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 b минимальна и анализируются преимущественно поверхностные слои, в которых более интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, влияющие на физические характеристики покрытия.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по темам «Структура» № АААА-А18-118020190116-6 и «Диагностика» № АААА-А18-118020690196-3 при частичной поддержке гранта РФФИ 15-08-06754_а.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ КОЛЬЦЕВОГО ОБРАЗЦА ПРИ АКСИАЛЬНОМ СЖАТИИ ПЛОСКИМ ШТАМПОМ

Коновалов Д. А.¹, Козлов А. В.², Коновалов А. В.¹

¹Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: satterkein@yandex.ru

²АО «Институт реакторных материалов»,
а/я 29, г. Заречный, Свердловская обл., 624250, Российская Федерация,
e-mail: kozlov_alv@irmatom.ru

Оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) реакторов типа БН эксплуатируются в неоднородных условиях: градиент температуры по длине оболочки составляет от 400 до 650 °С, изменение повреждающей дозы от 30 до 85 сна и выше. Дополнительно оболочки ТВЭЛОВ подвержены внутреннему нагружению вследствие распухания топлива и давления внутритвэльной газовой среды. Неоднородные условия эксплуатации приводят к значительным изменениям по высоте оболочки ТВЭЛА физических и механических свойств материала.

Для прогнозирования остаточного ресурса оболочек ТВЭЛОВ в АО ИРМ проводятся послереакторные исследования, включая определение их механических свойств по результатам испытаний при комнатной и повышенных температурах на аксиальное сжатие плоским штампом кольцевых образцов, вырезанных из разных частей по высоте оболочки ТВЭЛА, с записью диаграммы изменения силы сжатия в зависимости от перемещения. Достоинством этих испытаний является простота их применения в условиях защитных камер, как при изготовлении, так и при испытании облученных образцов. Результаты испытаний позволяют получать механические характеристики, которые являются дополнительным критерием для прогнозирования срока службы оболочек ТВЭЛОВ при эксплуатации в реакторе БН-600.

Для адекватной оценки механических свойств кольцевых образцов при данном виде испытаний важно иметь информацию об особенностях формоизменения образцов. Для решения этой задачи в ИМАШ УрО РАН выполнены эксперименты на сжатие плоским штампом необлученных кольцевых образцов, вырезанных из оболочек ТВЭЛОВ из аустенитной стали ЧС68 хд. Размеры колец: наружный диаметр 6,9 мм, толщина стенки 0,4 мм высота 2,5 и 5 мм. Кольца аксиально сжимали на 1,5; 2,5 и 4 мм. Испытания проведены на универсальной испытательной машине Zwicki Z2.5.

В работе приведены упругие константы и кривая деформационного упрочнения материала колец. Установлено, что во всех случаях имел место прогиб кольца вдоль его вертикальной оси симметрии, тем больший, чем больше величина сжатия кольца (рисунок). Представлены габаритные размеры деформированных колец и кривые нагружения. Полученные результаты важны для проведения оценки механических свойств материала ТВЭЛА, а также могут быть полезны для тестирования программ конечно-элементного моделирования больших пластических деформаций.



Форма колец после сжатия на 1,5 (а), 2,5 (б) и 4 (в) мм

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-07-00597_А.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ Cu/Al/Mg-ПРОВОДОВ

Калонов А. А., Глухов А. В., Волков А. Ю.

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: kalonov@imp.uran.ru*

Сплавы на основе меди и алюминия активно применяются в качестве проводников электрического тока. Наличие достаточно низкого удельного сопротивления и неплохих прочностных характеристик делают эти материалы привлекательными для практики. Создание композитных материалов на основе медной или алюминиевой матрицы позволит еще более повысить их функциональные свойства. Ранее мы показали, что получение Cu/Mg-композитов позволяет получить высокопрочный материал с низким удельным электросопротивлением [1]. Цель настоящей работы – изучение структуры, прочностных и электрических свойств тройных композитов с разным чередованием слоев меди, алюминия и магния.

Для проведения исследований было выбрано 2 композитных материала. В одном из них внутри алюминиевой матрицы находились магниевые волокна, помещенные в медную оболочку. Алюминиевая матрица другого композита снаружи была покрыта слоем меди, а внутри содержала набор магниевых волокон. В соответствии с чередованием слоев (от поверхности к центру) первый композит мы назвали Al/Cu/Mg, а второй композит Cu/Al/Mg. Исследуемые композиты были получены методом гидроэкструзии на лабораторной установке М-20 в ИФМ УрО РАН. Промежуточные отжиги в процессе деформации проводились при температуре 325 °С в течение 2 ч. В работе изучались механические свойства полученных композитов на растяжение (на проволочных образцах Ø 1,5 мм); электрические свойства измерялись на тонких проволоках Ø 0,275 мм (как при комнатной температуре, так и при нагревах и охлаждениях с постоянной скоростью). В представленной таблице приведены данные по содержанию компонентов в исследованных композитах.

Содержание компонентов в исследованных композитах

Композит	Содержание компонентов								
	Объемная доля, %			Массовые, %			Атомные, %		
	Cu	Al	Mg	Cu	Al	Mg	Cu	Al	Mg
Al/Cu/Mg	10,6	80,7	8,7	29,3	66,1	4,6	14,9	79,0	6,1
Cu/Al/Mg	55,6	37,2	7,2	81,4	16,5	2,1	64,7	31,0	4,3

Полученные экспериментальные результаты были сопоставлены с теоретическими оценками, выполненными на основе известных приближений [2]. Показано, что соответствие расчетов эксперименту очень сильно зависит от чередования слоев в том или ином композите. Сделано предположение, что в ходе сильной пластической деформации при изготовлении композитов на их интерфейсах происходит деформационно-индуцированное формирование твердых растворов и/или интерметаллидов, которые влияют на физические свойства образцов. Обнаружено, что на границах Mg-волокон происходит наиболее активное перемешивание компонентов. Это вызвано различием в деформационных механизмах магния с ГПУ-решеткой и алюминия (или меди) с ГЦК-решеткой. Результаты проведенного исследования представляют практический интерес и могут быть использованы в дальнейшем для получения высокопрочных проводников электрического тока.

Исследование выполнено в рамках государственного задания (тема «Давление») и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-33-90005).

Литература

1. Abnormally high strength and low electrical resistivity of the deformed Cu/Mg-composite with a big number of Mg-filaments / A. Yu. Volkov et al. // *Materials and Design*. – 2020. – Vol. 185. – P. 108276.
2. On the rule of mixtures for bimetal composites / B. Feng, Y. Xin, Z. Sun, H. Yu, J. Wang, Q. Liu // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2017. – Vol. 704. – P. 173–180.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ С НАПОЛНИТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ (ЗЕРНА, ПЛАСТИНКИ, ВОЛОКНА)

Гаришин О. К.¹, Кислицын В. Д.^{1,2}, Свистков А. Л.^{1,2}, Шадрин В. В.^{1,2}

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
д. 1, ак. Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: kislitsynvd@mail.ru*

²*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
д. 15, Букирева, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: kislitsynvd@mail.ru*

Проведены исследования механических свойств эластомерных нанокompозитов в зависимости от формы частиц наполнителя (зерна, пластинки, волокна). Во всех случаях в качестве матрицы использовали синтетический бутадиен-стирольный каучук СКМС-30-АРКМ-15. Наполнителями были детонационные наноалмазы, графен и одностенные графеновые нанотрубки. Для удобства сравнения все наполнители имели одинаковую массовую концентрацию. Образцы были испытаны на одноосное растяжение с постоянной скоростью. Наибольший усиливающий эффект наблюдался для нанотрубок и детонационных наноалмазов в то время, как введение в материал графена практически не отразилось на кривой нагружения.

Исследование вязкоупругого поведения этих композитов проводилось по разработанным в ИМСС УрО РАН методикам: 1) «вложенные циклы», когда на каждом последующем цикле уменьшается амплитуда и скорость деформирования; 2) циклическое нагружение с нарастающей амплитудой. В обоих случаях перед сменой направления движения захватов делали остановки на релаксацию (от 10 до 20 мин).

Циклические эксперименты показали, что кривые нагружения для композитов с наполнителями из наноалмазов и графена довольно близки к деформациям, равным примерно двукратному удлинению образца: присутствовал небольшой гистерезис и незначительные остаточные деформации. При дальнейшем увеличении амплитуды деформирования в композитах с наноалмазами наблюдалось заметное усиление материала и существенный рост диссипативных потерь.

Совсем по-другому вели себя эластомеры, наполненные одностенными нанотрубками. В этих композитах происходило значительное размягчение материала после первого цикла (эффект Маллинза) и большие гистерезисные потери на последующих циклах, с каждым последующим циклом гистерезис только возрастал, т. е. этот материал одновременно демонстрировал хорошо выраженные вязкоупругие свойства и эффект размягчения. При четырехкратном удлинении напряжения в образце с нанотрубками были примерно в 4,5 раза выше, чем для композитов с графеном и в 2 раза выше, чем для наноалмазов. Следует также отметить, что в этом материале происходит значительный рост остаточных деформаций по сравнению с другими композитами.

Высказана гипотеза, что отличие в механическом поведении эластомеров, наполненных нанотрубками (нановолокна) можно объяснить тем, что переориентация нановолокон при деформировании требует значительно больших затрат энергии, чем для зернистых или пластинчатых частиц. Кроме того, ввиду большой длины и гибкости нанотрубок должно происходить также изменение их конфигурации и взаимного расположения, на что также расходуется дополнительная энергия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00725_a).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ НА ОТРЫВ СЛОИСТОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА С НАДРЕЗАМИ

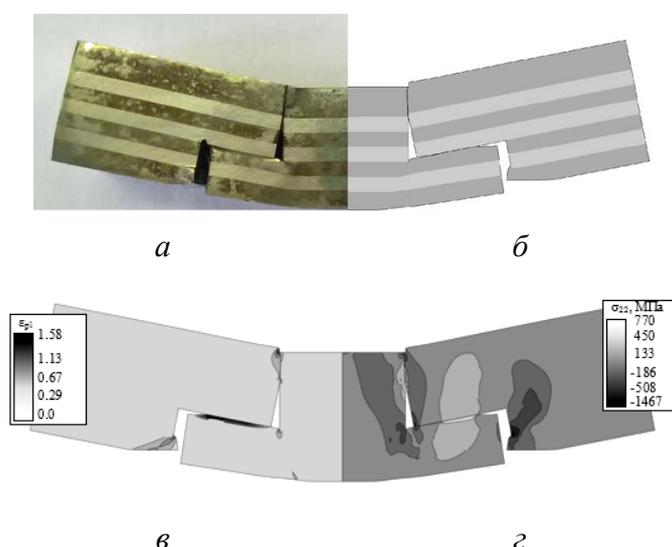
Крючков Д. И., Залазинский А. Г., Каманцев И. С.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: kru4koff@bk.ru*

Для изучения поведения композитных структур и определения условий инициализации и развития разрушения биметаллических соединений находят применение подходы, основанные на расчете удельной работы расслоения. Одним из таких подходов является метод виртуального закрытия трещин (VCCT) [1]. Обоснование метода дано в работе [2]. Одно из главных допущений VCCT сводится к тому, что рост трещин происходит по заранее определенному пути, а именно по межфазным границам. В настоящее время этот подход применяется с использованием имитационного моделирования методом конечных элементов.

Для одних и тех же условий испытаний различное количество слоев и схемы чередования слоев, а также их толщина накладывают свои особенности рассматриваемых материалов. Цель работы – выявить особенности формоизменения и определить напряженно-деформированное состояние образца с надрезами на межслойных границах 7-слойного биметаллического композитного материала 09Г2С-ЭП678 и рассчитать сопротивление отрыва с использованием энергетического критерия.

Образец для экспериментального и численного прогнозирования расслоения на границе раздела слоев в композиционных материалах, полученных методом горячей прокатки [3], показан на рисунке. Испытания плоского образца с надрезами на отрыв показали, что процесс его деформирования сопровождается нежелательным продольным изгибом, в результате чего на межслойных границах реализуется сложное напряженно-деформированное состояние. При этом отрыв сопровождается интенсивными пластическими деформациями сдвига.



Образец для испытания *a* и результат расчета конечно-элементной модели *б, в, г* после деформации

Реализована серия вычислительных экспериментов с варьированием критической скорости высвобождения упругой энергии. Проанализирована диаграмма зависимости усилия от перемещения Пуансона. С использованием энергетического критерия рассчитан уровень напряжений, приводящий к расслоению биметаллического соединения.

Для предотвращения нежелательного продольного изгиба (потери устойчивости образца при испытании на отрыв) разработана специальная оснастка.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00339-мол_а.

Литература

1. Krueger R. Virtual Crack Closure Technique: History, Approach, and Applications // Applied Mechanics Reviews. – 2004. – Vol. 57 (2). – P. 109–143. – DOI: 10.1115/1.1595677.
2. Valvo P. S. A Physically Consistent Virtual Crack Closure Technique for I/II/III Mixed-mode Fracture Problems // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 3. – P. 1983–1987. – DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.319 .
3. Кузнецов А. В., Каманцев И. С., Друкаренко Н. А. XXX международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2018) : сборник трудов конференции. – 2018. – С. 128–131.

РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕР-СИЛИКАТНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ПРИРОДНОГО ВЕРМИКУЛИТА С ДОБАВКОЙ FORUM

Лазарева Н. Н.¹, Кириллина Д. Ю.¹, Слепцова С. А.¹, Охлопкова А. А.^{1,2}

¹ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»,
д. 58, ул. Беллинского, г. Якутск, 677000, Российская Федерация,
e-mail: lazareva-nadia92@mail.ru

²ФГБУН «Институт проблем нефти и газа СО РАН»,
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677000, Российская Федерация

В ответственных узлах трения техники и оборудования применяются уплотнительные полимерные композиционные материалы. Полимерные композиционные материалы на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) могут применяться при температуре от -269 до 260 °С, обладают отличными диэлектрическими свойствами, химической инертностью, достаточно высокой прочностью и низким коэффициентом трения. Но улучшение некоторых свойств достигаются при введении в ПТФЭ различных наполнителей. Наполнение ПТФЭ слоистыми силикатами может приводить к повышению его износостойкости до 1000 раз. Этим и обусловлен повышенный интерес к природным слоистым силикатам в качестве перспективных модификаторов для создания полимер-силикатных композиционных материалов.

Композиты получали тремя способами: 1 – сухое смешение компонентов, содержащих неактивированный вермикулит; 2 – смешение компонентов с предварительной механоактивацией вермикулита в планетарной мельнице в течение 2 мин; 3 – смешение компонентов под воздействием ультразвуковых волн в УЗ-диспергаторе ИЛ100-6/3 в течение 10 мин.

Физико-механические свойства композитов определяли на универсальной испытательной машине «Autograph AGS-J Shimadzu» (Япония) по ГОСТ 11262-80. Триботехнические свойства определяли на высокотемпературном универсальном трибометре «UMT – 3 CETR» (США) по схеме трения «палец–диск», под нагрузкой 160 Н, со скоростью скольжения 0,2 м/с в течение 4 ч, с предварительной приработкой в течение 1,5 ч.

Анализ деформационно-прочностных характеристик композитов показывает, что композиты, содержащие неактивированный вермикулит, обладают низкой прочностью и эластичностью. Износостойкость данных композитов при этом выше, а коэффициент трения – ниже, чем у композитов с механоактивированным вермикулитом. Улучшение триботехнических свойств композитов с неактивированным вермикулитом, возможно, связано с тем, что неразрушенная в ходе механоактивации структура вермикулита сохраняет смазывающую способность силиката.

Сравнение свойств композитов с различным содержанием FORUM показывает, что композиты, содержащие 2 мас. % FORUM характеризуются более высокими показателями износостойкости, низким коэффициентом трения, а также высокой эластичностью. Поэтому УЗ-модификация проведена для композитов с 2 мас. % FORUM. УЗ-модификация композитов приводит к незначительному улучшению прочностных свойств по сравнению с композитами без обработки, но при этом коэффициент трения композитов увеличивается.

В целом, все композиты имеют более высокие коэффициенты трения по сравнению с исходным ПТФЭ. Но по сравнению с композитами, содержащими только вермикулит, значения коэффициентов трения снижаются. Предполагается, что снижению коэффициента трения способствует дополнительное введение добавки FORUM.

Таким образом, анализ результатов деформационно-прочностных и триботехнических испытаний дает основание полагать о перспективности разработки полимер-силикатных композитов, которые могут найти применение в качестве уплотнительных и герметизирующих элементов в узлах трения техники и оборудования, в том числе при низких температурах эксплуатации.

ВЛИЯНИЕ ОПЕРАЦИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ АЛЮМОТЕРМИТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ И ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
д. 1, ул. Metallургов, г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация,
e-mail: predein3@mail.ru*

При получении отливок алюмотермией прогноз их качеств и свойств затруднен. Отливки могут содержать газовые поры, быть химически и структурно неоднородными, обладают высокими, иногда критическими, внутренними напряжениями. Для сокращения доли бракованных отливок по вышеуказанным дефектам используются различные технологические приемы с целью получения литых заготовок с требуемыми качеством и свойствами [1].

Одним из приемов, позволяющим регулировать параметры и свойства продуктов экзотермической реакции, является нагрев термитных композиций перед их активацией. Температура предварительного нагрева термитных смесей оказывает влияние на выход металлической фазы, содержание в ней химических элементов, структуру [2]. Таким образом, целью настоящей работы является определение влияния температуры предварительного нагрева термитных композиций на указанные выше параметры получения отливок.

Для реализации цели в работе использованы экспериментальные смеси с содержанием восстановителя 25 % и оксидов железа 75 %, без введения наполнителей. Фракция используемых материалов 0,2–1,5 мм. Химический состав восстановителя – Al = 98,627 %; Cu = 0,018 %; Si = 0,855 %; Mn = 0,019 %; Fe = 0,462 %; Cr = 0,016 %; Ni = 0,004 %. Химический состав оксидов железа – Fe = 71,500 %; O₂ = 22,639 %; Si = 2,960 %; Mn = 1,188 %; Al = 0,697 %; Cu = 0,444 %; Ni = 0,188 %; Cr = 0,173 %; C = 0,150 %; S = 0,030 %; P = 0,030 %. Нагрев смесей осуществлялся до 200, 400, 600 °С. Тигли и формы изготовлены из графитированных электродов. В таблице представлен химический состав экспериментальных образцов и выход металла.

Химический состав и выход получаемой металлической фазы

Температура нагрева смесей, °С	Химический состав экспериментальных сплавов, %									Выход металла, %
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	
25	1,450	0,910	0,720	0,016	0,025	0,070	0,120	0,200	5,290	52,820
200	1,320	0,900	0,760	0,018	0,025	0,060	0,110	0,200	5,220	53,920
400	1,510	0,840	0,800	0,019	0,022	0,060	0,110	0,180	4,040	50,470
600	1,660	0,620	0,700	0,016	0,024	0,060	0,110	0,170	4,330	41,370

Структуры экспериментальных образцов содержат мартенсит [3]. У образцов, полученных с предварительным нагревом термитных композиций до 400 °С и 600 °С, структуры содержат шаровидный графит. Высокое содержание в заготовках остаточного алюминия обуславливает образование ферритных структур. Термообработка образцов при 760 °С позволяет получить структуры с зернистым перлитом или структурно-свободным цементитом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-18-50343.

Литература

1. In situ observations of reacting Al/Fe₂O₃ thermite: Relating dynamic particle size to macroscopic burn time / Michael D. Grapes, Robert V. Reeves, Kamel Fezzaa, Tao Sun, John M. Densmore, Kyle T. Sullivan // Combustion and Flame. – 2019. – Vol. 201. – P. 252–263.

2. Use of the Aluminothermic Reaction in the Treatment of Steel Industry By-Products / M. Kallio, P. Ruuskanen, J. Maki, E. Poylio, and S. Lahteenmaki // *Journal of Materials Synthesis and Processing*. – 2000. – Vol. 8 (2). – P. 87–92. – DOI: 10.1023/A:1026569903155.
3. The Influence of Structure on the Strength Properties of Casting Steel Obtained with the Use of Thermite Materials / O. N. Komarov, S. G. Zhilin, D. A. Potianikhin, V. V. Predein, E. E. Abashkin, A. A. Sosnin, and A. V. Popov // *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2016)*, AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785. – P. 040027-1–040027-5.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Степченков А. К.¹, Макаров А. В.^{1,2}, Соболева Н. Н.², Вопнерук А. А.³, Котельников А. Б.³

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: alexander.stepchenkov@gmail.com

²Институт машиноведения УрО РАН,

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

³НПП «Машипром», д. 5, ул. Краснознаменная, Екатеринбург, 620012, Российская Федерация

Свойства поверхности определяют эксплуатационные характеристики изделия. Поэтому эффективным способом повышения надежности и долговечности деталей машин и механизмов является нанесение защитных покрытий на основе никеля, обладающих высокой стойкостью к коррозии, износу и высокотемпературному окислению [1,2]. Перечисленные свойства никелевых покрытий обуславливают их широкое применение при изготовлении газовых турбин, экструдеров, прокатных валков и др. [2]. Для сохранения работоспособности изделий при повышенных температурах эксплуатации в совокупности с различными видами износа требуются покрытия с высокой термической стабильностью. Одним из способов ее повышения для никелевых покрытий системы Ni-Cr-B-Si, сформированных лазерной наплавкой, является проведение термической обработки при температурах 1000–1075 °С [3, 4]. В связи с этим актуальной задачей является изучение эффективности применения термической обработки для покрытий на основе никеля, нанесенных способом газотермического напыления.

Цель работы – изучение влияния высокотемпературной термической обработки на структуру и микротвердость покрытий на основе никеля, сформированных на подложке из хромциркониевой бронзы способом газотермического напыления.

Используя методы сканирующей электронной микроскопии (с системой рентгено-спектрального микроанализа) и рентгеноструктурного анализа, в работе установлено влияние высокотемпературной термической обработки на структурно-фазовое состояние никелевого покрытия. Выявлен положительный эффект проведения термообработки покрытия, который заключается в сохранении уровня микротвердости поверхностного слоя после дополнительного термического воздействия (нагрев и выдержка 2 ч при температуре 900 °С с последующим охлаждением на воздухе).

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИФМ УрО РАН по темам «Структура» (№ АААА-А18-118020190116-6), «Лазер» и ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-38-00452_мол_а. Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Phase interaction induced texture in a plasma sprayed-remelted NiCrBSi coating during solidification: An electron backscatter diffraction study / L.-Y. Chen, T. Xu, H. Wang et al. // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 358. – P. 467–480.
2. Rachidi R., Elkhiel B., Delaunois F. Microstructure and mechanical characterization of NiCrBSi alloy and NiCrBSi-WC composite coatings produced by flame spraying // Materials Science and Engineering: B. – 2019. – Vol. 241. – P. 13–21. – DOI: 10.1016/j.mseb.2019.02.002.
3. Improving the properties of a rapidly crystallized NiCrBSi laser clad coating by high-temperature processing / A. V. Makarov, N. N. Soboleva, I. Yu. Malygina, E.V. Kharanzhevskiy // Journal of Crystal Growth. – 2019. – Vol. 525. – P. 125200. – DOI: 0.1016/j.jcrysgro.2019.125200.
4. Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications / A. V. Makarov, Yu. S. Korobov, N. N. Soboleva, Y. V. Khudorozhkova, A. A. Vopneruk, P. Balu, M. Barbosa, I. Y. Malygina, S. V. Burov, A. K. Stepchenkov // Letters on Materials. – 2019. – Vol. 9 (4). – P. 470–474. – DOI: 10.22226/2410-3535-2019-4-470-474.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СТАЛЬНЫХ ТРУБ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Дмитриев С. Ф.¹, Ишков А. В.², Фадеев Д. А.¹, Маликов В. Н.¹,
Сагалаков А. М.¹, Катасонов А. О.¹

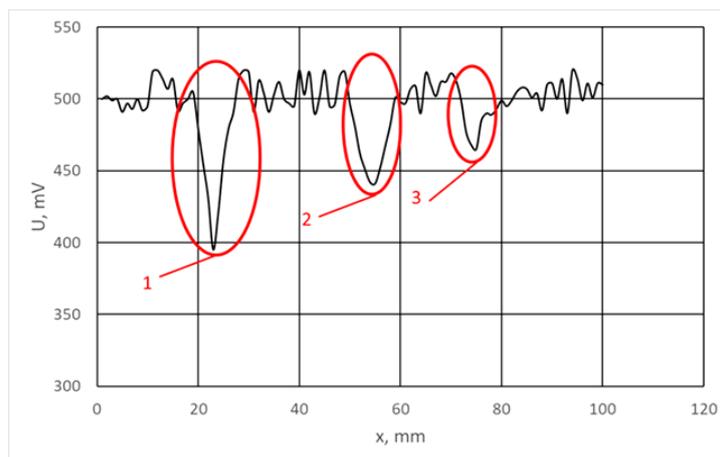
¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет,
д. 61, Ленина, Барнаул, 656060, Российская Федерация,
e-mail: dmitrfsf@gmail.com

²ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет,
д. 73, Красноармейский, Барнаул, 656060, Российская Федерация,
e-mail: mirotnas@gmail.com

В последние годы во все возрастающих объемах при строительстве топливопроводов, зданий, судов и т.д. используется толстолистовой прокат из высокопрочных сверхнизкоуглеродистых сталей типа 08Г2Б. Благодаря ультрамелкозернистой структуре, получаемой в результате контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением, легированию и сбалансированным механизмам упрочнения, стали группы прочности К65(Х80) обладают высокой конструктивной прочностью.

Одна из актуальных областей использования высокопрочной стали в строительстве – трубопроводные системы различного назначения (магистральные, технологические и т. д.). Проблемы обеспечения надежности и безаварийности стальных трубопроводов из-за их подверженности к естественному старению стоит весьма остро. Отказы трубопроводных систем, как правило, обусловлены коррозией и механической усталостью металла. Согласно статистическим данным, 29 % дефектов стальных высокопрочных труб составляют дефекты сплошности типа наружной коррозии. Наибольшей чувствительностью к поверхностным дефектам сплошности стали обладают электромагнитные (в частности вихретоковый) методы контроля. Методы контроля данного типа позволяют обеспечить быстрый и удобный контроль, определить глубину трещины и позволить принять решение о состоянии исследуемого участка трубопровода.

Цель работы – демонстрация способности разработанного вихретокового преобразователя находить дефекты сплошности в данном типе металла. Конструкция вихретокового преобразователя, используемого для контроля стальных труб, представляла собой магнитопровод, изготовленный из пермаллоя 81НМА в виде пирамиды. На магнитопровод наматывали возбуждающую обмотку, измерительную обмотку и компенсационную обмотку.



Результаты исследования образца: 1 – трещина, расположенная на глубине 1 мм; 2 – трещина на глубине 3 мм, 3 – трещина на глубине 5 мм

В качестве объекта исследования использовались стальные трубы с модельными дефектами. Дефекты сплошности моделировали в виде трех трещин, залегающих на разной глубине. Зависимость амплитуды сигнала от места расположения преобразователя над объектом контроля показывает места расположения дефектов по падению амплитуды (рисунок).

Хорошо видно, что при подобном типе дефектов, амплитуда сигнала начинает падать еще до приближения к месту расположения трещины. При этом наименьшее значение амплитуды сигнала соответствует середине трещины в металле и позволять делать вывод о ее месторасположении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00272 «Исследование сплавов, композиционных и полупроводниковых материалов, сверхтонких проводящих пленок с помощью миниатюрных и сверхминиатюрных вихревых преобразователей».

GUIDED WAVES SENSING WITH PIEZOELECTRIC WAFER ACTIVE SENSORS

Shpak A. N.¹, Golub M. V.¹, Glinkova S. A.¹, Fomenko S. I.¹, Mueller I.²

¹*Institute for Mathematics, Mechanics and Informatics, Kuban State University,
149, Stavropolskaya, Krasnodar, 350000, Russian Federation,*

e-mail: alisashpak7@gmail.com; m_golub@inbox.ru; glinkvasfja@gmail.com; sfom@yandex.ru

²*Institute for Mechanics, Bochum University of Applied Sciences,*

140, Lennerhofstraße 44801 Bochum, Germany,

e-mail: inka.mueller@hs-bochum.de

Structural health monitoring, non-destructive testing and materials science employ acousto-ultrasonic methods to monitor the structural health of a civil structure or a material sample. For this purpose, piezoelectric wafer active sensors (PWASs) are used to excite guided waves in the structure and sense the response, which is used to extract information about the health state of the examined object [1]. To apply guided-wave based monitoring methods, laser Doppler vibrometry (LDV) is among the most convenient techniques to collect data about the propagation of guided waves. However, LDV is still quite expensive and usually used in laboratory tests, while in practice Lamb waves are sensed with PWASs integrated into the inspected structure.

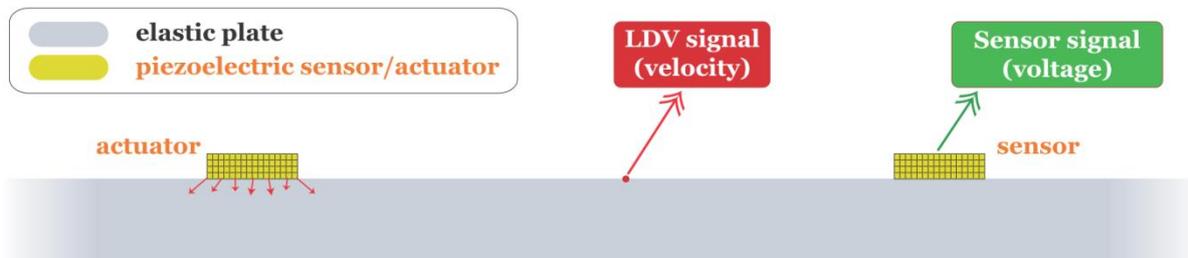


Fig. 2. Scheme of the guided-wave based monitoring with piezoelectric sensors

The hybrid mathematical approach was proposed by the authors in [2] to simulate piezo-induced guided waves propagating in a plate-like structure and the model was experimentally verified in [3]. In this study, the developed mathematical model is enhanced to simulate several PWASs operating both as actuators and sensors, see fig. 1. The choice of boundary conditions for simulating PWASs is discussed. The frequency-domain spectral element method is employed to model the dynamic behaviour of a PWAS and the semi-analytic boundary integral equation method is used to simulate the propagation of guided waves in an elastic layered waveguide. Such a combination allows solving the coupled problem with PWASs of arbitrary shape and provides a decomposition of the excited wave-field into separate Lamb wave modes.

The experimental investigation of excitation and sensing of Lamb waves in an aluminium plate has been performed. For this purpose, a sample with two rectangular PWASs attached at the surface of the plate has been used. Two kinds of signal acquisition techniques have been employed. Velocities of guided waves have been measured with LDV at certain points at the surface while PWAS working as a sensor have registered voltage signals, which are integral characteristics over the whole electrode area of the PWAS. The difference between signals obtained within these two approaches is discussed in the present study.

The interaction of guided waves with all kinds of defects may result in Lamb wave modes conversion, e.g. see [4]. Therefore, the sensor capability to register different kinds of propagating Lamb wave modes is analysed. The proposed mathematical model allows considering excitation and sensing of a certain Lamb wave mode [3, 4]. Thus, propagation of symmetric and antisymmetric Lamb waves through the domain with sensing PWAS has been simulated to investigate the efficiency of a rectangular PWAS to register various Lamb waves.

References

1. Raghavan A., Cesnik C. E. S. Review of guided-wave structural health monitoring // *The Shock and Vibration Digest*. – 2007. – Vol. 39 (2). – P. 91–114.
2. Golub M. V., Shpak A. N. Semi-analytical hybrid approach for the simulation of layered waveguide with a partially debonded piezoelectric structure // *Applied Mathematical Modelling*. – 2019. – Vol. 65. – P. 234–255.
3. Theoretical and experimental investigation of Lamb waves excited by partially debonded piezoelectric transducers / A. N. Shpak, I. Mueller, M. V. Golub, C.-P. Fritzen // *Smart Materials and Structures*. – 2020 (accepted).
4. Lamb wave scattering, conversion and resonances in an elastic layered waveguide with a surface-bonded rectangular block / M. V. Golub, A. A. Eremin, A. N. Shpak, R. Lammering // *Applied Acoustics*. – 2019. – Vol. 155. – P. 442–452.

СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА – ЛЕ ШАТЕЛЬЕ

Чечулина Е. А.^{а)}, Попов Ф. С.^{б)}, Трусов П. В.^{в)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29 Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}zhenya-chechulina@yandex.ru; ^{б)}popovfyodor@yandex.ru; ^{в)}tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Неустойчивая пластическая деформация (эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ)) сопровождается спонтанным зарождением и распространением полос макролокализованной деформации [1]. Природу этого явления обычно связывают с динамическим деформационным старением дислокаций, обусловленным взаимодействием подвижных дислокаций с диффундирующими атомами примеси. Металлические твердые растворы демонстрируют эффект ПЛШ при соответствующих температурах и напряжениях. Изучение механизмов прерывистой ползучести имеет большое практическое значение, так как большинство конструкционных металлов и сплавов склонно к этому явлению.

Представлена структура 3-уровневой модели [2] для описания эффекта Портевена – Ле Шателье. Обсуждаются возможные механизмы формирования атмосфер примесных атомов в окрестностях дислокаций. Основное внимание в работе уделено описанию дислокационного скольжения, взаимодействия дислокаций друг с другом (образование барьеров) и с атомами примеси. Последнее вносит существенный вклад в движение дислокаций за счет образования «облаков» примесных атомов. В зависимости от скоростей движения дислокаций «облака» примесных атомов изменяются в объеме и, соответственно, изменяется вклад примесных атомов в критические напряжения сдвига по системам скольжения (СС).

В рассмотрение вводятся следующие масштабные уровни: макроуровень, мезоуровень-1 и мезоуровень-2. При описании деформирования кристаллита используется модель мезоуровня-1 и подмодель мезоуровня-2. На мезоуровне-1 описывается механическое состояние кристаллита. Определяемые на мезоуровне-1 касательные напряжения на СС передаются в качестве воздействия на мезоуровень-2, где рассматривается эволюция плотностей дефектов, описывается изменения полей концентрации примесных атомов, определяются критические напряжения и скорости движения дислокаций в СС, а по ним – скорости сдвигов по СС. С мезоуровня-2 на мезоуровень-1 передаются скорости сдвигов по СС.

Основополагающими механизмами в предлагаемой работе являются процессы «сбора» и «сброса» примесных атомов во время движения дислокаций по СС. В зависимости от значений средних скоростей движения дислокаций по СС возможны различные сценарии взаимодействия дислокаций с атомами примеси: если средняя скорость дислокаций меньше скорости диффузии атомов примеси при заданной температуре, то происходит процесс «сбора» вплоть до достижения концентрации определенных критических значений; если средняя скорость дислокаций больше скорости диффузии, то происходит процесс «сброса» (освобождение дислокации от облака примесных атомов); если средняя скорость дислокаций меньше скорости диффузии и концентрация захваченных примесных атомов достигла насыщения, то дислокация движется вместе с образовавшимся облаком до тех пор, пока не произойдет изменения скорости из-за взаимодействия с другими носителями деформации. Получены зависимости интенсивностей напряжений от интенсивности деформаций, значения плотностей дислокаций от интенсивности деформаций и показан выход в режим прерывистой пластичности при определенной температуре и скорости нагружения материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-41-590694–р_а), Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект № № 0751-2020-0027).

Литература

1. Трусов П. В., Чечулина Е. А. Прерывистая текучесть: физические механизмы, экспериментальные данные, макрофеноменологические модели // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 3. – С. 186–232. – DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.10.
2. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МЕХАНИЧЕСКОГО МЕТАМАТЕРИАЛА НА ЕГО ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ

Ахметшин Л. Р.^{1, 2, а)}, Смолин И. Ю.^{1, 2, б)}

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}akhmetshin.lr@gmail.com; ^{б)}smolin@ispms.ru

Метаматериалы представляют собой класс материалов, необычные свойства которых определяются не их химическим составом, а специальным образом организованной структурой. Применение механических метаматериалов с необычными свойствами является многообещающим для авиакосмической и автомобильной техники.

Цель работы – исследование деформационного поведения трехмерного метаматериала при изменении параметров его структуры.

Рассмотрен метаматериал с тетрахиральной структурой, описанной в работах [1, 2]. Элементарная ячейка состоит из 6 поверхностей (куб), которая состоит из кольца и четырех стержней (ребер). Эта структура выбрана благодаря ее конструкторским особенностям – при приложении одноосной нагрузки появляется дополнительная степень свободы, а именно – вращение. В качестве базовых параметров элементарной ячейки метаматериала взяты значения: $l = 50$ мм – длина ячейки; $t = 5$ мм – ширина ребра; $h = 5$ мм – толщина ребра; $r_2 = 17,5$ мм – внешний радиус кольцевого элемента; $r_1 = 12,5$ мм – внутренний радиус кольцевого элемента, $\theta = 25^\circ$ – угол наклона ребра; $n = 81$ – количество элементарных ячеек.

Математическая постановка задачи деформирования метаматериала принята в рамках линейной теории упругости. Ограничиваемся случаем перемещений, не приводящих к контактному взаимодействию составляющих элементарной ячейки. Упругие свойства материала элементарной ячейки метаматериала: $E = 200$ ГПа – модуль Юнга; $\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона. Моделирование проводилось при изменении параметров элементарной ячейки. Все параметры подбирались таким образом, чтобы они являлись независимыми, например, при изменении ширины стержня толщина и другие параметры оставались исходными. Рассматривается одноосное растяжение и сжатие образца. Граничные условия прикладывались следующим образом: на одной из граней образца – жесткая заделка, на противоположной грани – заданное перемещение, соответствующее 3 % деформации, остальные грани – свободны от напряжений.

При одноосном деформировании образца метаматериала с исходной структурой угол поворота составил $7,86^\circ$. При уменьшении r_1 до значения 0 мм, угол поворота уменьшается на 35%, что связано с увеличением удельного объема метаматериала. Зависимость имеет почти линейный характер. Значения t уменьшались от 5 до 1 мм. В данном случае разница между конечным и исходным значением угла поворота метаматериала является наибольшей среди представленных параметров – $2,83^\circ$ или 36 %. При изменении толщины ячейки h от 5 до 1 мм отмеченная ранее тенденция «с уменьшением удельного объема уменьшаем угол поворота» не сохраняется. Уменьшение параметра h , приводит к незначительному увеличению угла поворота – порядка 3 %. Значение угла наклона ребра, выходящего из вершины ячейки метаматериала, и увеличивалось до 40° , что привело к уменьшению угла поворота метаматериала на 31 %.

Работа выполнена при поддержке Российского научного Фонда (грант № 16-19-10264).

Литература

1. Fu Ming-Hui, Zheng Bin-Bin, Li Wei-Hua. A novel chiral three-dimensional material with negative Poisson's ratio and the equivalent elastic parameters // *Composite Structures*. – 2017. – Vol. 176. – P. 442–448. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.05.027.
2. Frenzel T., Kadic M., Wegener M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist // *Science*. 2017. – Vol. 358 (6366). – P. 1072–1074. – DOI: 10.1126/science.aao4640.

РАЗРУШЕНИЕ ТОНКОСТЕННОГО СФЕРИЧЕСКОГО СОСУДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

Стружанов В. В.¹, Чайкин А. Е.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук»,
34, ул. Комсомольская, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация

²«Институт естественных наук и математики Уральского Федерального университета»
19, ул. Мира, 620000, Екатеринбург, Российская Федерация

Рассматривается тонкостенный сферический сосуд с внутренним радиусом b и толщиной $t \ll b$. Сосуд находится под действием монотонно возрастающего внутреннего давления интенсивностью p . Нагружение происходит квазистатически при постоянной температуре. При таком нагружении материал сферы находится в плоском напряженном состоянии. Имеет место равномерное растяжение элемента материала ($\sigma_\varphi = \sigma_\theta$; $\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\theta$). Используется сферическая система координат.

Свойства материала на всех стадиях деформирования, включая разупрочнение, определяется выражением [1]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_\varphi \\ \sigma_\theta \end{pmatrix} = \psi(\varepsilon_\varphi, \varepsilon_\theta) \cdot \frac{E}{1-\mu^2} \begin{pmatrix} 1 & \mu \\ \mu & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_\varphi \\ \varepsilon_\theta \end{pmatrix},$$

где E и μ – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона в упругости.

Выражение представляет собой вариант деформационной теории, который опирается на сохранение пропорциональности тензоров напряжений и деформаций на всех стадиях деформирования и учитывает объемное разрушение материала на стадии разупрочнения. Для определения параметра ψ используется полная диаграмма деформирования с падающей ветвью, полученная при кручении образца с круглым поперечным сечением [2].

Определение предельного давления опирается на аппарат теории катастроф [3]. Для этого выписывается лагранжиан системы, состоящей из суммы потенциальной энергии элементов сферы и работы внешней силы, взятой со знаком минус. Разрушение прогнозируется в вырожденной критической точке данного лагранжиана.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 10-01-96018-р_урал_a и грант РФФИ № 10-08-00135-а.

Литература

1. Стружанов В. В., Коркин А. В., Чайкин А. Е. Об одном подходе к определению предельной несущей способности механических систем с разупрочняющимися элементами // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. – 2018. – Т. 22 (4). – С. 762–773.
2. Стружанов В. В. Определение диаграммы деформирования с падающей ветвью по диаграмме кручения цилиндрического образца // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2012. – Т. XV, № 1 (49). – С. 138–144.
3. Постон Т. Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. – М.: Мир, 1980. – 608 с.

ИЗМЕНЕНИЕ УШИРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ДИФРАКЦИОННОЙ ЛИНИИ ПРИ УПРУГОМ ВНЕЦЕНТРЕННОМ РАСТЯЖЕНИИ СОСТАВНОГО (ТРЕХСЛОЙНОГО) КОМПАКТНОГО ОБРАЗЦА

Гуляев В. П.¹, Петров П. П.², Степанова К. В.²

¹*Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
д. 58, ул. Белинского, г. Якутск, 677000, Российская Федерация,
e-mail: uekztdg@mail.ru*

²*Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова,
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677890, Российская Федерация,
e-mail: ppp32@mail.ru*

Надежность эксплуатации металлических конструкций и изделий обеспечивается высоким уровнем качества методов неразрушающего контроля, их рабочими характеристиками, возможностями и способностями выявлять изменения служебных свойств конструкций и изделий. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля является метод рентгеновской дифрактометрии. Особое внимание специалистов и экспертов направлено на повышение эффективности использования рентгеновских дифрактометров, в том числе портативных, для технической диагностики и неразрушающего контроля эксплуатируемых промышленных объектов, контроля качества изготовления деталей и т. п. [1, 2].

В работе приводятся результаты экспериментального исследования, связанного с уточнением возможности использования характеристик профиля дифракционной рентгеновской линии, прежде всего, изменения формы профиля и его полуширины (B) для диагностирования уровня загруженности эксплуатируемых конструкций различных технических систем. Основной задачей исследования было выявление изменений микродеформации поверхностных слоев металла образцов, подвергнутых действию статической внешней нагрузки, не вызывающей пластических деформаций в вершине концентратора напряжений. Исследование проводилось на двух партиях образцов внецентренного растяжения (типа компактных) составленных из трех пластин толщиной 7,5 мм, соединенных между собой стальными заклепками. Пластины одной партии образцов были соединены 2 заклепками, второй – 6 заклепками. После внецентренного растяжения составного образца на дифрактометре Rigaku производилась рентгеновская съемка фиксированных точек поверхности каждой пластины отдельно.

Показано, что методом рентгеновской дифрактометрии (анализом величины изменения, т. е. уширения полуширины (B) профиля дифракционной линии) возможно оценить изменение уровня поля напряжений при повышении уровня внешней нагрузки, действующей на образец внецентренного растяжения на 10 ... 15 %. Установлено влияние конструктивных факторов (характера заклепочного соединения пластин в составной (компактный) образец с боковым надрезом) на изменение относительной полуширины профиля ΔB дифракционной линии, измеренного на фиксированных расстояниях от вершины надреза.

Литература

1. Носова Е. А. Исследование влияния деформации и термической обработки на уровень остаточных макронапряжений и физического уширения линий интерференции рентгеновских лучей в листовых сплавах АМг5, АМг6, АМг10 и Д16 // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2017. – № 3 (55). – С. 168–178.
2. Определение остаточного ресурса пуансонов холодной объемной штамповки / Е. Н. Сосенушкин, И. Г. Роберов, А. Ю. Карнилов, Р. И. Абдурахманов // Вестник МГТУ. – 2018. – № 1 (44). С. 45–51.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ КОЛЬЦЕВОГО ОБРАЗЦА НА СТАДИИ ЕГО ОВАЛИЗАЦИИ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕМ РАСТЯЖЕНИИ

Карагерги Р. П.¹, Коновалов А. В.², Козлов А. В.¹, Евсеев М. В.¹

¹АО «Институт реакторных материалов»,
а/я 29, г.Заречный, Свердловской обл., 624250, Российская Федерация,
e-mail: karagergi_rp@irmatom.ru

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

При испытаниях кольцевых образцов на растяжение на полуцилиндрических опорах на начальной стадии происходит оваллизация образца. При этом неконтролируемые деформации и напряжения локализуются на отдельных участках, что вносит ошибку в определение механических свойств, тем большую, чем меньше пластичность исследуемого материала. Вследствие неидеальности формы захвата, неоднородности шероховатости внутренней поверхности оболочки твэла после эксплуатации и, как следствия, различия трения по поверхности взаимодействия захвата с образцом. Это приводит к невоспроизводимости расположения областей локализации деформации при формоизменении кольцевого образца. Задача устранения этой неопределенности является актуальной.

Цель работы – выявление влияния неоднородности распределения деформации кольцевого образца на стадии его оваллизации на определение механических свойств и учет этого влияния.

Оваллизация кольцевого образца может проводиться как при его растяжении, так и при аксиальном сжатии плоским штампом, причем во втором случае воспроизводимость деформации существенно выше, чем в первом. Для сравнения были проведены испытания кольцевых образцов оболочки размером $6,9 \times 0,4 \times 2,4$ мм³. На торцевую поверхность образцов с помощью лазерного маркера GardS-20 с точностью 3 мкм через равные расстояния были нанесены 32 метки. Во время испытания с помощью фотоаппарата, оснащенного объективом для макросъемки (модель EF-S 60 mmf/2,8 MacroUSM), записывали видео файл деформирования образца на стадии вытяжки, что позволило следить за распределением деформации в различных схемах. Кроме того, с использованием программного обеспечения, разработанного специалистами ИМАШ УрО РАН, рассчитывалась эволюция характеристик напряженно-деформированного состояния при испытаниях. Расчетные и экспериментальные результаты в обеих схемах оваллизации сопоставлялись между собой.

Было установлено, что картина распределения деформаций при аксиальном сжатии более воспроизводима и однородна и лучше совпадает с результатами расчета НДС, чем при растяжении. Следствием этого является подтвержденный на облученных образцах с низкой пластичностью экспериментальный факт, что образцы после аксиального сжатия при последующем растяжении показывают более высокие характеристики пластичности и прочности, чем образцы при непосредственном растяжении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-07-00597_А.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА: ОПИСАНИЕ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Макаревич Е. С.^{а)}, Кондратьев Н. С.^{б)}, Трусов П. В.^{в)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}makareviches@inbox.ru; ^{б)}kondratevns@gmail.com; ^{в)}tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Процессы термомеханической обработки металлов и сплавов применяются во многих отраслях промышленности для получения материалов с широчайшим спектром физико-механических свойств за счет изменения параметров этих процессов. Вместе с тем развитие технологий требует расширения и математического аппарата, нацеленного на моделирование процессов обработки с возможностью описания эволюционирующей внутренней структуры материала (а следовательно, и его физико-механических свойств) в результате приложенных внешних термомеханических воздействий. В последние десятилетия во всем мире активно развивается многоуровневый подход [1–3] к построению конститутивных моделей материалов (определяющих соотношений), позволяющий учитывать предысторию воздействий на материал за счет введения на каждом структурно-масштабном уровне внутренних переменных, который и применяется в данной работе.

Рассматривается проблема построения многоуровневой физической модели неупругого деформирования сталей, позволяющей учитывать бездиффузионные твердотельные фазовые (мартенситные) переходы, происходящие в материале в результате термомеханических воздействий. Структура разработанной модели включает три структурно-масштабных уровня, для которых сформулирована замкнутая система уравнений. На верхнем масштабном уровне ставится краевая задача для исследуемой области (в частности в качестве таковой может выступать представительный объем материала в макросмысле). Каждая точка рассматриваемой области, трактуемая как элемент мезоуровня-I, описывается как статистическая совокупность однородных подобластей нижележащего масштабного уровня (элементов мезо-II – субзерен, фазовых составляющих). На всех структурно-масштабных уровнях модели в рассмотрение вводятся явные внутренние переменные, отражающие эволюцию дефектной и зеренной структуры. Отличительной особенностью модели является введение нижнего масштабного уровня (мезо-II) таким образом, что однородной элемент этого уровня при выполнении критерия фазового превращения полностью переходит в новую фазу с высокой (относительно кинематического квазистатического нагружения) скоростью, близкой к скорости звука в рассматриваемой кристаллической среде. При этом распространение превращения на мезоуровне описывается с учетом взаимодействия между соседствующими элементами (мезо-II) в рамках элемента мезо-I. Критерий мартенситного превращения формулируется на основе принципов классической термодинамики необратимых процессов. Согласно этому критерию осуществляется, в частности, выбор наиболее вероятной действующей трансформационной системы при мартенситном переходе. Разработан алгоритм модели и изложены особенности его реализации, связанные с высокоскоростной перестройкой решетки на мезоуровне из ГЦК в ОЦТ. Результатом такой перестройки является резкая смена физико-механических свойств материала на уровне представительного макрообъема, связанная с реализовавшимся на мезомасштабном уровне фазовым превращением в результате термомеханического воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-69-47009).

Литература

1. McDowell D. L. A perspective on trends in multiscale plasticity // International Journal of Plasticity. – 2010. – Vol. 26 (9). – P. 1280–1309. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2010.02.008.

2. Multilevel models of inelastic deformation of materials and their application for description of internal structure evolution / P. V. Trusov, A. I. Shveykin, E. S. Nechaeva, P. S. Volegov // *Physical Mesomechanics*. – 2012. – Vol. 15 (3–4). – P. 155–175. – DOI: 10.1134/S1029959912020038.
3. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.

ДИАГНОСТИКА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ В КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЕ

Нассонов В. В.^{а)}, Балина О. В.^{б)}

Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}nassonovvv@tyuiu.ru; ^{б)}balinaov@tyuiu.ru

Аспектом влияния коррозионной среды на долговечность при статическом или циклическом нагружении и методам испытаний посвящено большое количество работ и стандартов. При статическом или циклическом нагружении в коррозионной среде проявляется эффект Ребиндера и пластическая деформация поверхностных слоев начинается при напряжениях меньших, чем при испытании в нейтральной среде [1]. В этом случае диаграмма растяжения слабо отражает начало пластической деформации тонкого поверхностного слоя, а использование для контроля вихревых токов или термо-ЭДС невозможно или затруднено из-за наличия вокруг образца жидкой электропроводной среды. В работах [2, 3] описан метод определения начальных стадий пластической деформации при нагружении в коррозионной среде путем измерения потенциала коррозии между стандартным электродом и образцом при стабилизации температуры коррозионной среды.

Для уменьшения влияния температуры на результаты измерений нами предложено в качестве электрода сравнения использовать образец, идентичный нагружаемому. При испытании образцов низколегированных трубных сталей в 3 %-м водном растворе NaCl уверенно диагностируется пластическая деформация поверхности начиная с 0,05 % неупругого удлинения образца. Полученные результаты представлены в таблице. При усталостных испытаниях образцов из стали 20Н2М в коррозионной среде потенциал коррозии увеличивается при напряжениях меньших предела выносливости на воздухе, определяемого неразрушающим методом [4]. При статическом нагружении в упругой области потенциал коррозии также монотонно изменяется.

Кроме того, потенциал коррозии чувствителен к видам и режимам термической и механической обработки и неоднородностям структуры и свойств материала.

Зависимость потенциала коррозии от величины пластической деформации

Сталь	Потенциал коррозии (E, мВ) при относительном удлинении (δ , %)										
	δ , %	0,05	0,1	0,15	0,2	0,4	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0
09Г2С	E, мВ	1,5	3	4	6	21	27	32	42	51	54
X60		4	6	8	19	32	38	47	56	62	65
X70		4	7	12	31	48	53	62	73	78	82

Литература

1. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных средах. Физико-химическая механика : избранные труды. – М. : Наука, 1979. – 384 с.
2. Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов. – М. : Metallurgy, 1985. – 207 с.
3. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М. : Metallurgy, 1981. – 271 с.
4. Нассонов В. В., Новиков В. Неразрушающее определение предела выносливости магнитоупругим методом // Заводская лаборатория. – 1984. – № 8. – С. 62–64.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО-УПРОЧНЕННЫХ СЛОЯХ МАТЕРИАЛОВ

Одинцев И. Н.^{1, а)}, Плотников А. С.^{2, б)}, Плугатарь Т. П.^{1, в)}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,

4, Малый Харитоньевский пер., Москва, 101990, Российская Федерация

²НИЯУ МИФИ, 31, Каширское шоссе, Москва, 115409, Российская Федерация,

e-mail: ^{а)}ino54@mail.ru; ^{б)}asplotnikov@mephi.ru; ^{в)}tplugar@gmail.com

Для повышения эксплуатационных характеристик изделий машиностроения активно применяются различные технологии модифицирования поверхности [1]. Одной из важных задач для их оптимизации является исследование уровней и распределений возникающих в материале остаточных напряжений (ОН). Получение требуемых закономерностей может осуществляться проведением испытаний аналогичным образом обработанных специальных (тестовых) образцов. Для построения требуемых распределений ОН, как правило, применяются те или иные разрушающие воздействия на них с регистрацией и последующей математической интерпретацией ответных деформационных откликов.

В качестве эффективной конкретизации общего подхода рассматривается методика испытаний, согласно которой в образцах в форме балок-полос наращивается по глубине узкая поперечная прорезь-паз. Деформационные отклики в виде полей приращений нормальной компоненты перемещений (прогибов) на каждом этапе его углубления регистрируются методом электронной спекл-интерферометрии [2, 3]. Типичные интерферограммы, записываемые на противоположной от создаваемого паза поверхности образца, представлены на рис. 1. Применение специальной компенсационной схемы обеспечивает измерение требуемых параметров деформационных откликов в режиме реального времени без расшифровки картин полос. Для математической обработки первичных экспериментальных результатов с целью оценки средних напряжений, действовавших в отдельных приповерхностных слоях, предварительно решается серия характерных для подобных случаев модельных задач [3].

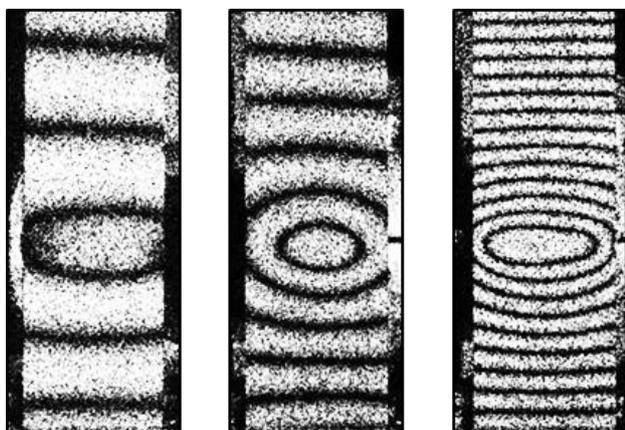


Рис. 1. Типичные спекл-интерферограммы приращений нормальных перемещений образца при углублении паза

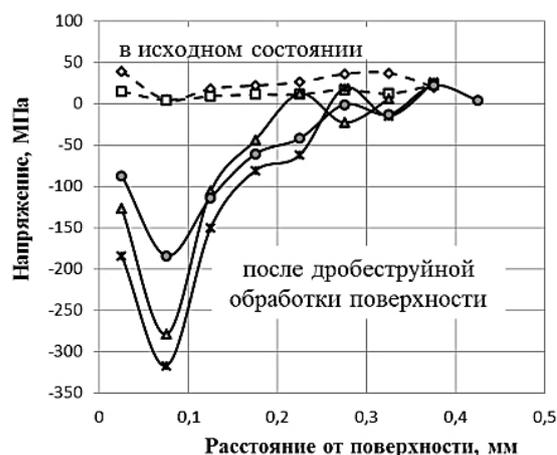


Рис. 2. Распределения остаточных напряжений в алюминиевых образцах

С использованием рассмотренного подхода проведено исследование распределений ОН в металлических образцах после различных режимов дробеструйной обработки поверхностей. Характерные результаты измерений приведены на рис.2. Дальнейшие методические разработки могут осуществляться в аспектах совершенствования как инструментария и схем получения первичной информации, так и ее механо-математической интерпретации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00372.

Литература

1. Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин / под ред. Г. В. Москвитина. – М. : ЛЕНАНД, 2013. – 400 с.
2. Исследование процесса деформации материала опико-корреляционными методами / А. Н. Луценко, И. Н. Одинцев, А. В. Гриневич, П. Б. Северов, Т. П. Плугатарь // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № S4. – С. 70–86.
3. Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин / под ред. Г. В. Москвитина. – М. : ЛЕНАНД, 2019. – С. 429–446.

DENDRITE-REINFORCED AMORPHOUS AND GRAPHENE-REINFORCED METAL COMPOSITES. DEFORMATION MECHANISMS AND STRENGTH CHARACTERISTICS

Polukhin V. A.^{1,2}, Estemirova S. X.¹, Kurbanova E. D.¹

¹*Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, 620016, Russian Federation*

²*Ural Federal University, 620002, Ekaterinburg, Russian Federation,
e-mail: p.valery47@yandex.ru*

The mechanisms of strengthening amorphous alloys with the transformation of their structures under the impact of intense deformations into a dendrite-reinforced composite with a nanostructured amorphous matrix compatible with a dendritic nanophase were analyzed with the use of molecular dynamic (MD) simulation and experimental data (fig. 1). The yield strength of reinforced amorphous CuZrAl alloys under tensile deformations of up to 20 % at a maximum load of 2300 MPa is more than 1550 MPa, this being 15 % higher than the initial value before the deformation processing of the alloys. However, the tests of graphene-reinforced nanolayered composites (metal/graphene) demonstrated even higher characteristics, namely for a Ni sample reinforced with 100 layers of graphene (with a height of 80 nm and a diameter of 10 nm), the tensile strength was of about 4.0 GPa, and this was 100 times as high as the tensile strength of an analogous polycrystalline sample; for graphene-reinforced Ti samples, the highest strength was achieved due to strong hybridized Ti-C bonds with the Young's modulus for hexagonal planes of ~1 TPa. The thermal stability of the structure of Ti/graphene alloys was ~3700 K, which is 1000 K higher than that of traditional heat-resistant alloys. The characteristics obtained by MD simulation were also compared with the available experimental data concerning metal glasses and laminated nanocomposites reinforced with graphene [1–4]. The MD simulation of nanocrystalline composites reinforced with graphene sheets was performed; the strength of these composites was compared with that of amorphous-matrix dendrite-hardened composites formed as a result of mechanical-thermal treatment of amorphous metal alloys with a partial nanodendritic crystallization of the amorphous structure.

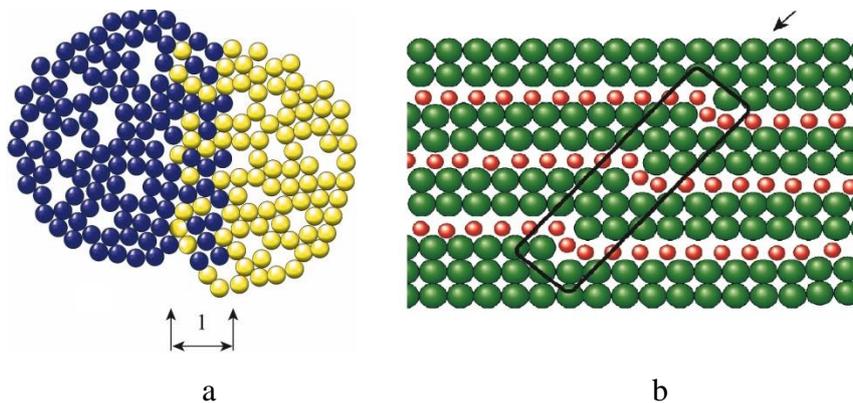


Fig. 1. Schematic representation of the relaxation of STZ (shear transformation zones) and compaction for dendrite-strengthened amorphous (a) and graphene-reinforced (broken lines from small circles) metal composites (b): the arrows indicate the zonal shear bands caused by the loads.

This work was performed on the basis of the State Assignment of IMET, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, according to the Program of the RAS for topic 19-2, project No. 0396-2019-0002) and project No. 18-10-3-28 of the Comprehensive Program of Ural Branch of the RAS.

References

1. Polukhin V. A., Vatolin N. A., Kurbanova E. D. Formation of a Intermediate Order in Metallic Glasses and a Long Order in Nanocrystalline Alloys with Allowance for the Character of Binding and the Transformation of the Short Order in a Melt // Russian Metallurgy (Metally). – 2018. – No. 2. – P. 96–109. – DOI: 10.1134/S0036029518020167.
2. Polukhin V. A., Sidorov N. I., Vatolin N. A. Presolidification Changes in the Structural–Dynamic Characteristics of Glass-Forming Metallic Melts during Deep Cooling, Vitrification, and Hydrogenation // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – Vol. 2019. – No. 8. – P. 758–780. – DOI: 10.1134/S0036029519080123.
3. Suryanarayana C., Inoue A. Bulk Metallic Glasses. Technology & Engineering. – Second Edition. – CRC Press. Tay-lor & Francis, 2017. – 520 p.
4. Polukhin V. A., Vatolin N. A. Modeling of disordered and nanostructured phases. UrO RAN Publ., Yekaterinburg, 2011. – 363 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОШЛИФОВ ПРИ НАГРУЗОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ

Ахметханов Р. С.

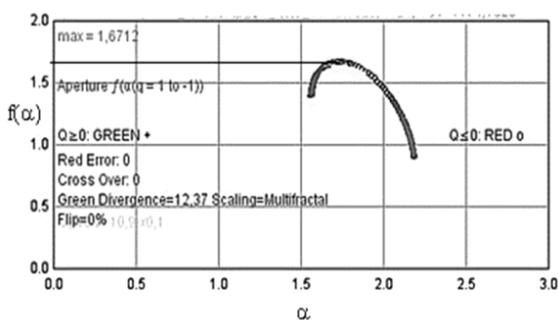
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова (МАШ РАН)
4, Малый Харитоньевский пер., Москва, 101990, Российская Федерация,
e-mail: mibsts@mail.ru

В докладе приведены результаты исследований на много цикловое усталостное разрушение стали 12ГС. Механизм усталостного разрушения во многом связан с неоднородностью реальной структуры материалов (различие размеров, очертаний, ориентации соседних зерен металла; наличие различных включений – шлаков, примесей; дефекты кристаллической решетки, дефекты поверхности материала – царапины, коррозия и т. д.). Усталостные трещины, как правило, начинаются от поверхности детали. Поэтому состояние поверхностного слоя оказывает существенное влияние на уровень локальных напряжений. Все повреждения поверхности образца являются источниками концентрации напряжений и могут вызывать весьма значительное снижение предела усталостной долговечности [1].

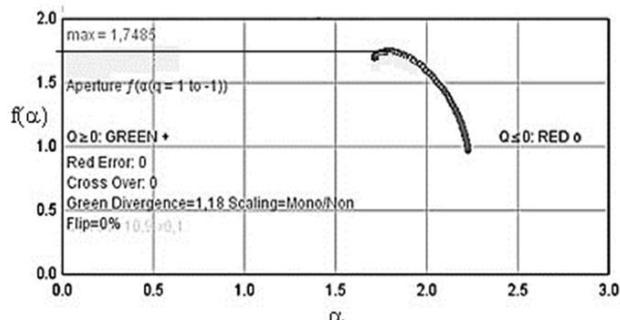
С целью оценки корреляции между характерными изменениями изображения микрошлифов и усталостной долговечностью проведены исследования нагрузочных испытаний стали 12ГС при циклических нагрузочных испытаниях.

В исследовании изображений микрошлифов использованы методы теории фракталов [2]: проведены оценки фрактальной размерности изображений микрошлифов на различных стадиях нагружения, монофрактальности и мультифрактальности изображений микрошлифов. Структурные свойства изображения исследовались методами кластеризации (K-средних) и оценивались с помощью функции связности Минковского.

Образование микротрещин на поверхности образца можно разделить на три стадии: первая – образование незначительного количества микротрещин, которое не приводит к заметному изменению фрактальной размерности; вторая – увеличение количества микротрещин с разрушением зерен фаз материала, при этом фрактальная размерность изображения и число зерен увеличиваются. Третья стадия (предразрушение образца) – фрактальная размерность увеличивается, а фрактальный спектр из мультифрактального становится монофрактальным (рисунок).



а



б

Мультифрактальный спектр изображений микрошлифов: а – при числе циклов нагружений $N = 0$; б – при числе циклов нагружений $N = 95\,000$

Таким образом, при увеличении числа микротрещин на поверхности образца фрактальная размерность увеличивается; а перед разрушением образца мультифрактальный спектр $f(\alpha)$ изображения микрошлифа становится монофрактальным. И это позволяет оценить уровень накопленных повреждений по виду мультифрактального спектра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 20-58-00019_Бел_а.

Литература

1. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М : Техносфера, 2004. – 384 с.
2. Ахметханов Р. С. Применение вейвлет-анализа и теории фракталов в исследовании изображений микрошлифов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81 (3). – С. 31–37.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АКУСТИЧЕСКИМ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ

Ахметханов Р. С.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова (МАШ РАН)
4, Малый Харитоньевский пер., Москва, 101990, Российская Федерация,
e-mail: mibsts@mail.ru*

В работе приведен метод анализа диагностических акустических сигналов при обнаружении дефектов в композиционных материалах. При этом используются методы теории фракталов. Акустические сигналы анализируются с позиций характеристик мультифрактальных спектров.

Наличие многочисленных экспериментальных результатов, устанавливающих различными способами связь избыточного шума с дефектами во многих твердых материалах, убедительно указывает на то, что возможной причиной шума являются дефекты [1]. При действии нагрузки в зоне дефектов генерируются низкочастотные шумы и вследствие этого в спектральной характеристике акустического сигнала возникают низкочастотные составляющие, что приводит к изменению мультифрактального спектра акустического диагностического сигнала на монофрактальный.

В статье приведен пример акустической диагностики панели из композиционного материала. При исследовании панели импедансным акустическим методом были обнаружены зоны, в которых значение импеданса превышал допустимый уровень (таблица). Наибольшее значение амплитуды записанного акустического сигнала были в зоне 4. Также эта зона выделялась по уровню максимального значения по спектральной плотности мощности, и при этом частота имела наименьшее значение.

С целью определения дефектных зон был применен фрактальный анализ записанных акустических сигналов. В дефектной зоне акустический сигнал приобретает монофрактальные (бифрактальные) свойства, тогда как в других зонах сигнал является мультифрактальным [2]. Монофрактальность обозначает значительное преобладание в структуре сигналов частотных составляющих с максимальными значениями спектральной плотности мощности (СПМ) (таблица) по сравнению с остальными частотными составляющими. Вид СПМ для этой зоны характеризуется областью максимальных значений уровня сигнала и ниспадающих ветвей в обе стороны от границ частотного интервала – акустический сигнал становится из монофрактальным.

Характеристики акустических диагностических сигналов

Номер неоднородности	Максимальная амплитуда сигнала	Фрактальная размерность, D_0	Асимметрия мультифрактального спектра, ΔD	Ширина мультифрактального спектра, S	СПМ (программа Auduo)	
					Частота, f	Максимальное значение уровня сигнала, ДВ
1	0,037	1,6090	0,609	0,975	6875,0	-58,07
2	0,038	1,4732	0,423	1,065	6312,5	-58,01
3	0,148	1,4957	0,745	0,950	5937,5	-53,88
4	0,295	1,6356	0,273	0,715	5687,5	-37,27
5	0,140	1,6232	0,550	1,435	6656,2	-49,70

Полученные результаты позволяют принять потерю мультифрактальности за критерий изменения состояния системы или наличия дефекта. Известно, что также потеря мультифрактальности происходит при переходе динамической системы из одного состояния в другое [3].

Литература

1. Разуменко Д. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. – 2008. – № 9. – С. 168–174.
2. Akhmetkhanov R. S. The patterns of the power spectral density distribution of fractal and multifractal processes // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – Т. 47 (3). – С. 235–240.
3. Ахметханов Р. С. Потеря мульти-фрактальности – критерий перехода системы из одного состояния в другое // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 5. – С. 20–29.

ТРЕХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Шарифуллина Э. Р.^{а)}, Трусов П. В.^{б)}, Швейкин А. И.^{в)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}elvira16_90@mail.ru; ^{б)}tpv@matmod.pstu.ac.ru; ^{в)}alexsh59@bk.ru*

Одним из перспективных направлений развития технологий изготовления и обработки сложных деталей из металлических материалов является использование деформирования в режиме структурной сверхпластичности (СП). Эффективным инструментом проектирования подобных технологических процессов является математическое моделирование. Предложена модифицированная статистическая многоуровневая модель на базе физической теории упруговязкопластичности, позволяющая с достаточной степенью адекватности описывать ключевые физические процессы, наблюдаемые при деформировании с переходом к режиму структурной СП, с учетом эволюционирующей структуры материала [1].

В модель включено описание следующих основных механизмов и процессов: внутризеренного дислокационного скольжения, поворотов решеток кристаллитов, изменения зеренной структуры; особое внимание уделено рассмотрению зернограничного скольжения, лидирующего при структурной СП, и сопровождающих его аккомодационных механизмов – зернограничной диффузии и динамической рекристаллизации. Модель учитывает взаимодействие механизмов зернограничного и внутризеренного скольжения, а также изменение их ролей при деформировании, что отражено в соответствующих законах упрочнения. Кроме того, значимым условием для реализации деформирования в режиме структурной СП является наличие мелкозернистой структуры с равноосной формой зерен и преобладанием большеугловых границ. Как показывает анализ экспериментальных результатов, в ряде сплавов при испытании на растяжение в режиме СП даже при умеренных температурах осуществляется динамическая рекристаллизация, сопровождающаяся некоторым ростом среднего размера зерен и сохранением их равноосной формы. Разработанная модифицированная модель содержит описание размеров, формы, взаиморасположения кристаллитов и границ, а также их изменения в процессе деформирования с учетом динамической рекристаллизации.

Предложенная модель была применена для исследования процессов простого и сложного нагружения представительного объема поликристаллического материала с параметрами, соответствующими алюминиевому сплаву 1420. Расчетные результаты для одноосного растяжения находятся в удовлетворительном соответствии экспериментальным данным [2]. Определены и проанализированы роли основных механизмов, их взаимовлияние, эволюция структуры материала при деформировании с переходом к режиму структурной СП. Полученные закономерности согласуются с наблюдаемыми в экспериментах [2–4]. Представлены результаты моделирования для других видов нагружения (простого сдвига, сложного нагружения с изломом траектории деформации) образцов из сплава 1420, они согласуются с физическими представлениями.

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

Литература

1. Трусов П. В., Шарифуллина Э. Р., Швейкин А. И. Многоуровневая модель для описания пластического и сверхпластического деформирования поликристаллических материалов // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22 (2). – С. 5–23.
2. Fabrication of bulk ultrafine-grained materials through intense plastic straining / P. V. Berbon, N. K. Tsenev, R. Z. Valiev, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1998. – 29A. – 2237–2243.

3. Мышляев М. М., Шпейзман В. В., Камалов М. М. Стадийность деформации микрокристаллического алюминий-литиевого сплава в условиях сверхпластичности // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43 (11). – С. 2015–2020.
4. Perez-Prado M. T., Gonzalez-Doncel G. Texture changes during deformation of a 7475 superplastic aluminum sheet alloy // Textures and Microstructures. – 2000. – Vol. 34 (1). P. 33–42. – DOI: 10.1155/TSM.34.33.

ПРЯМАЯ ТРЕХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ПОЛИКРИСТАЛЛА: ВЛИЯНИЕ ГРАНИЦ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦА

Янц А. Ю., Трусов П. В., Яковлев А. Ю., Кондратьев Н. С.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский пр-т, 614990, Российская Федерация,
e-mail: maximus5.59@gmail.com*

В работе представлена модель для описания поведения, эволюции внутренней структуры и физико-механических свойств поликристаллического образца в процессах произвольного механического нагружения, основанная на введении внутренних переменных, многоуровневом подходе и физических теориях упруговязкопластичности [1, 2]. Рассмотрение указанных процессов ведется на трех структурно-масштабных уровнях: макроуровне – уровне представительного объема материала; мезо-1 – однородного кристаллита; мезо-2 – уровне описания эволюции дислокационной субструктуры. На макроуровне определяются эффективные свойства и напряженно-деформированное состояние материала. Состояние мезоуровня-1 определяется значениями внутренних переменных: искажениями и ориентацией кристаллической решетки, накопленными сдвигами по системам скольжения и критическими напряжениями на них. На мезоуровне-2 вводятся плотности дефектов на каждой кристаллографической системе скольжения – дислокаций, барьеров, определяются соотношения, описывающие эволюцию этих дефектов. На этом уровне также описываются взаимодействия между полными и расщепленными дислокациями, приводящими к образованию барьеров (например, Ломера–Коттрелла), явным образом рассматривается взаимодействие дислокаций с границами кристаллитов.

Такая трехуровневая модель была реализована и встроена в существующий пакет прикладных программ для решения краевых задач на основе метода конечных элементов. Каждому конечному симплекс-элементу ставится в соответствие элемент мезо-1 – однородный кристаллит, включающий структурный мезоуровень-2 описания эволюции дислокационной субструктуры. Грани симплексов ассоциируются с границами кристаллитов и характеризуются площадью и нормалью, изменяющихся в процессе деформирования. Для каждого кристаллита хранится информация о соседних кристаллитах (ассоциированными с соседними элементами), что позволяет описать зернограничное упрочнение [3], основываясь на состоянии не только рассматриваемого элемента, но и состояниях соседних кристаллитов и границ между ними [4].

Осуществлена постановка краевых задач исследования различных нагружений поликристаллических образцов, которые решены с помощью созданного авторами пакета прикладных программ. Образцы отличались распределением внутренних границ по углу разориентации соседних кристаллитов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-31-70027, гранта Президента РФ МК-2970.2019.1.

Литература

1. Трусов П. В., Нечаева Е. С., Швейкин А. И. Применение несимметричных мер напряженного и деформированного состояния при построении многоуровневых конститутивных моделей материалов // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16 (2). – С. 15–31.
2. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.
3. Кондратьев Н. С., Трусов П. В. Моделирование неупругого деформирования поликристаллических материалов с учетом упрочнения за счет границ кристаллитов // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2012. – № 4. – С. 92–100.
4. Trusov P. V., Yants A. Yu., Teplyakova L. A. Direct Crystal Elastoviscoplasticity Model: An Application to the Study of Single Crystal Deformation // Physical Mesomechanics. – 2019. – Vol. 22 (4). – P. 275–286. – DOI: 10.1134/S1029959919040039.

**ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ
В МАКРОФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ УПРУГОПЛАСТИЧНОСТИ:
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГОГО ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО СПИНА**

Янц А. Ю.^{а)}, Мишталь Е. Ю.^{б)}, Трусов П. В.^{в)}

*Пермский государственный национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}maximus5.59@gmail.com; ^{б)}o-lein.keitmishtal@yandex.ru; ^{в)}tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Проблема построения определяющих соотношений (ОС) для случая больших градиентов перемещений до сих пор окончательно не решена, в связи с чем является одной из весьма значимых задач нелинейной механики деформируемого твердого тела. В качестве базового определяющего соотношения для построения большинства конститутивных моделей часто используются упругие ОС (в конечной или скоростной форме). В настоящее время для описания процессов с большими градиентами перемещений чаще используется скоростная запись определяющих соотношений в текущей конфигурации, что влечет за собой необходимость использования коротационных производных. При этом основной задачей является физически обоснованное введение разложения движения на квазитвердое и деформационное. В скоростной форме упругое определяющее соотношение можно представить в виде:

$$\Sigma^{\text{cor}} = \mathbf{P} : \mathbf{E}^{\text{cor}}, \quad (1)$$

где Σ – тензор напряжений Коши; \mathbf{P} – тензор 4-го ранга упругих характеристик; \mathbf{E} – некоторый произвольный, в общем случае неголономный тензор деформации; верхний индекс «cor» означает независимую от выбора системы отсчета коротационную производную [1, 2].

При работе со скоростными ОС появляется проблема выбора производной. В работах Н. Xiao, О. Bruhns, А. Meyers [3] была предложена производная, позволяющая удовлетворить известным ограничениям, накладываемым на ОС и названная логарифмической коротационной производной. Главным ее свойством является то, что эта производная от левого тензора деформации Генки в точности равна тензору деформации скорости \mathbf{D} :

$$\hat{\mathbf{H}}^{\Omega_{\log}} = \dot{\hat{\mathbf{H}}} + \hat{\mathbf{H}} \cdot \Omega_{\log} - \Omega_{\log} \cdot \hat{\mathbf{H}} = \mathbf{D}, \quad (2)$$

где Ω_{\log} – логарифмический спин. Авторами [3] также было предложено использование производной, основанной не только на полных мерах деформаций, но и на упругой. Однако в цитируемой работе отсутствует достаточно полное для реализации предлагаемого соотношения описание алгоритма. В настоящей работе представлен разработанный авторами алгоритм определения упругой составляющей градиента деформации \mathbf{F}^e по заданному закону изменения полного градиента \mathbf{F} в рамках симметричной теории пластического течения. Полученный алгоритм позволяет определить тензоры \mathbf{V}^e , \mathbf{R}^e (соответствующие полярному разложению \mathbf{F}^e) в любой момент времени по значению \mathbf{D}^e . Наряду с определением составляющих \mathbf{F}^e и \mathbf{F}^p определяется упругий логарифмический спин, определяющий коротационные производные упругой меры Генки и тензора напряжений Кирхгоффа:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{\Omega_{\log}^e} &= \dot{\mathbf{K}} + \mathbf{K} \cdot \Omega_{\log}^e - \Omega_{\log}^e \cdot \mathbf{K} = \mathbf{P} : \mathbf{D}^e, \\ \hat{\mathbf{H}}^{\Omega_{\log}^e} &= \dot{\hat{\mathbf{H}}} + \hat{\mathbf{H}}^e \cdot \Omega_{\log}^e - \Omega_{\log}^e \cdot \hat{\mathbf{H}}^e = \mathbf{D}^e. \end{aligned} \quad (3)$$

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект № 0751-2020-0027), гранта РФФИ № 20-31-70027.

Литература

1. Поздеев А. А., Трусов П. В., Няшин Ю. И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. – М. : Наука, 1986. – 232.
2. Трусов П. В., Кондратьев Н. С., Швейкин А. И. О геометрически нелинейных определяющих соотношениях упругого материала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 3. – С. 182–200.
3. Xiao H., Bruhns O., Meyers A. Hypo-Elasticity Model Based upon the Logarithmic Stress Rate // J. Elasticity. – 1997. – Vol. 47 (1). – P. 51–68. – DOI: 10.1023/A:1007356925912.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СОСТОЯНИЕ ПОДВОДНОГО ПЕРЕХОДА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА «ХАТАССЫ–ПАВЛОВСК» ЧЕРЕЗ Р. ЛЕНА

Аммосов Г. С.^{а)}, Корнилова З. Г.^{б)}, Иванов Д. С.^{в)}

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, РС (Я),
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 667980, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}ammosov.g@mail.ru; ^{б)}zoya_korn@mail.ru; ^{в)}ivanovds@gmail.com*

Подводные переходы магистральных газопроводов (ППМГ) – это сложные инженерные объекты, имеющие следующие отличительные особенности [1]: прохождение через ряд участков, резко отличающихся друг от друга по характеру воздействия (берег, пойма, русловая часть); обязательная балластировка трубопровода, компенсирующая его положительную плавучесть; затрудненный доступ для проведения ремонтно-профилактических работ.

На основе обобщения проектных данных рассмотрены особенности размыва первой нитки ППМГ через р. Лена с учетом гидроморфологических факторов.

Трасса газопровода через р. Лена на пойменных участках расположена в области распространения вечномерзлых грунтов мощностью более 250 м, в зоне русловой части – прерывистого распространения вечномерзлых грунтов. Исследуемая территория находится в пределах сильного воздействия экзогенных рельефообразующих процессов.

Со стороны левого берега трасса ППМГ через р. Лена пересекает Табагинскую протоку, несколько озер, ручейков и озерных котловин. На острове «Улуу Арыы» делает поворот на 68° к основному руслу и дальше идет прямо, пересекая русло, острова Бэргэсэ Юес, Манастыыр, Хаптагайскую протоку до с. Павловск.

В статье приводятся данные о проведении промеров профиля дна р. Лена на створе ППМГ «Хатассы–Павловск». Также рассмотрено влияние русловых процессов на динамику размыва дюкера первой нитки ППМГ.

За шесть лет (2003–2009 гг.) эксплуатации 1-й нитки ППМГ через р. Лена возникло четыре «инцидента», три в русловом участке, один на пойменном участке данного магистрального газопровода [2]. Вторая нитка ППМГ «Хатассы–Павловск» через р. Лена проложена в апреле 2009 г.

При весеннем ледоходе, весенних и летне-осенних паводках интенсивность размыва дна и основного берега у с. Павловск наблюдается там, где проходит ППМГ. Этому способствуют, с одной стороны, гидрологический процесс, связанный с наводнениями и увеличением течения реки у берегов островов и коренного берега, с другой, – ежегодное подтаивание многолетнемерзлых грунтов береговых склонов [3].

Размыв дна реки в области траншеи ППМГ является одним из характерных факторов снижения ресурса при траншейной прокладке дюкера через водные преграды. При размыве дна и оголении дюкера ППМГ к эксплуатационным нагрузкам добавляются не предусмотренные проектом значительные гидродинамические нагрузки, возникают крутящие, изгибающие и опрокидывающие моменты, а также явления гидроабразивного эрозионного износа [4] и впоследствии усталостное разрушение отдельных его участков по основному металлу и сварным соединениям.

Литература

1. Шалагин В. Н., Бриллиантов А. Н. Особенности диагностического обслуживания ППМГ // Газовая промышленность. – 2005. – № 10. – С. 16–20.
2. Аммосов А. П., Корнилова З. Г. О строительстве подводных переходов магистральных трубопроводов : аналит. обзор. – Якутск : Изд-во ЯГУ, 2008. – 58 с.
3. Изменение уровней воды и уклонов водной поверхности при заторных явлениях на р. Лене / А. П. Аммосов, Р. Н. Шпакова, К. И. Кусатов, З. Г. Корнилова // Известия

Иркутского госуд. университета. Серия Науки о Земле. – 2019. – Т. 28. – С. 3–20. – DOI: 10.26516/2073-3402.2019.28.3.

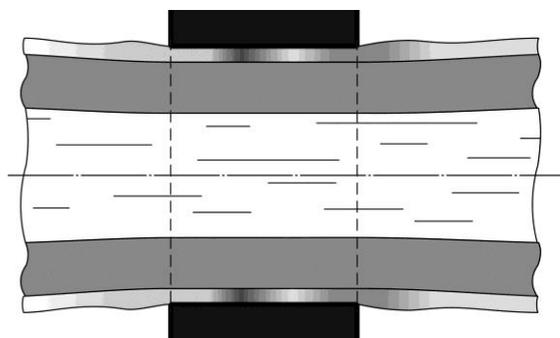
4. Медведев С. С., Ермолаев Г. Г. Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации подводных переходов магистральных газопроводов и пути их решения, Самара, март 1997 : мат-лы совещания «Пути обеспечения надежности и безопасности подводных переходов магистральных трубопроводов». – 1987. – С. 48–58.

О НАПРЯЖЕНИЯХ ПОД ВТУЛКОЙ, НАДЕТОЙ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ТРУБУ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Казаков К. Е.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
101-1, пр-т Вернадского, г. Москва, 119526, Российская Федерация,
e-mail: kazakov-ke@yandex.ru*

Работа посвящена постановке и построению аналитического решения задачи контакта жесткой втулки и трубы с наружным неоднородным покрытием переменной толщины, находящейся под внутренним давлением. На практике наличие таких покрытий требуется, например, для защиты основной, несущей, трубы от агрессивных внешних сред, для ее электрической изоляции и т. п. В силу процессов производства она может обладать как неоднородностью, так и переменной толщиной. Учет подобных особенностей важен при анализе напряженно-деформированного состояния трубы, на которую надета втулка, так как величины напряжений изменяются и, следовательно, меняется срок службы такого соединения (рисунок).



Труба с покрытием под внутренним давлением, обжатая втулкой

Математической моделью вышеописанной задачи является интегральное уравнение, содержащее как интегральные операторы с постоянными пределами интегрирования (операторы Фредгольма), так и операторы с переменными пределами интегрирования (операторы Вольтерра). В это уравнение входят функции, описывающие упругие свойства покрытия и его толщину, и следовательно, они могут быть быстро изменяющимися или даже разрывными.

При построении решения при помощи классических подходов, не учитывающих особенности входящих в уравнение функций (например методом разложения в ряд по тригонометрическим или полиномиальным функциям), возникают существенные трудности при расчетах, в которых исследователи вынуждены ограничиваться конечным, сравнительно небольшим числом членов ряда. Использование небольшого количества слагаемых (порядка 30–50) объясняется тем, что при большем их числе начинает накапливаться вычислительная погрешность. Однако такого количества слагаемых часто не хватает для корректного описания, например профиля покрытия. В работе описан особый подход, основанный на использовании специального представления и специальных базисных функций, построенных на основании имеющихся в уравнении особенностей. Он позволяет в выражении для контактного давления под втулкой выделить функции, описывающие свойства и профиль покрытия в виде отдельных слагаемых и множителей. Поэтому в реальных расчетах для достижения высокой точности достаточно ограничиться сравнительно небольшим количеством слагаемых в ряде.

Построенное решение показывает, как наличие неоднородности и переменного профиля влияет на распределение контактных давлений под втулкой. Это позволяет проводить более точный анализ такого сопряжения при оценке долговечности и надежности конструкции в целом.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ государственной регистрации АААА-А20-120011690132-4) и частично поддержана грантами РФФИ № 18-01-00770 и 19-51-60001.

AUTOMATIC SYSTEMS FOR ULTRASONIC INSPECTION OF PIPELINES (SURVEY)

Yordan N. MIRCHEV¹, Pavel H. Chukachev²

¹*Institute of Mechanics – BAS, 4 Acad. G. Bonchev St., 1113 Sofia, Bulgaria,
e-mail: mirchev@imbm.bas.bg; nntdd@abv.bg*

²*Multitest Ltd., 1 Atanas Dalchev St., Varna, Bulgaria,
e-mail: multitest@multitest.bg*

Abstract

Pipelines are responsible industrial facilities used to transport oil products. They consist of tubular modules joined to each other by welding. The main deviations from the integrity inspected by non-destructive testing methods are the thinning of the parent metal and discontinuities in the welded joints. This is the radiographic method that traditionally has been used for many years to inspect the welded joints. In recent years, with the development of mechatronic systems, the application of semi-automatic and automatic pipeline ultrasonic inspection systems has been increased over the use of radiography. The implementation of computer control, through algorithms for processing the collected information signals, provided the possibility of displaying the inspection information in two-dimensional images. In this paper, an overview is made of the commercial pipeline ultrasonic inspection systems, their capabilities and limitations, as well as specifications and techniques for their application.

Keywords: automatic ultrasonic inspection, two-dimensional images, engineering critical assessment (ECA), electronically scanning systems, mechanized scanning systems.

STRUCTURAL ASPECTS OF DEFORMATION IN STUDYING EARLY STAGES OF THE DISINTEGRATION OF MARTENSITE IN THE NATURAL AGING PROCESS

Zhukova M. A., Levashova Ye. L., Yakovitskaya M. V.

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
29, Politekhnicheskaya St., 194064 St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: marina11c1948@yandex.ru; mava1968@gmail.com; l_ekaterina_1@mail.ru*

Premature brittle (non-intentional) fracture shows a reduction in plasticity that is not acceptable under certain temperature and time conditions. It was planned that a study [1, 2] of different physical phenomena at early stages of the disintegration of martensite after hardening would explain the appearance of plastically deformed regions – the causes of the localization of deformation, formation and growth of cracks.

Early stages of the disintegration of martensite were detected in the process of natural aging by the method of internal friction and by a change in coercive field strength. Studies were carried out on samples of high-carbon steels in annealed and hardened conditions. In tests, a device was used to measure decrement at low (acoustic) amplitudes. The margin of error for measuring the decrement of fluctuations did not exceed 2 %.

An analysis of the experiment shows that at the initial stage of aging, the concentration of “free” carbon in the solid solution drops. The maximum concentration of carbon atoms at dislocation lines increases and reaches the maximum value of 0.2 % C.

Studies were carried out on preliminarily hardened specimens of instrument steels to detect early stages of the disintegration of martensite in the aging process by a change of coercive force.

The hypothesis was confirmed that by the method of internal friction and by a change of coercive force, similar to methods of electrical resistance, internal friction and size changes [3, 4], one can gain a deeper understanding of the mechanism and kinetics of structural transformations at early stages of the disintegration of freshly hardened martensite.

From the above, it follows that the homogeneity of the disintegration of solid solutions and volume dilatation on the boundary of the section of the forming phase matrix are determining factors for the appearance of plastically deformed regions. They are the dominant causes in the localization of deformation, in resistance to the formation and growth of cracks.

The concepts developed in this work will make it possible to determine methods for increasing work capacity and preventing premature fractures of objects.

References

1. Biblik I. V., Vakulenko K. V., Kazak I. B. Estimating the metal strength degradation by the combined method // 7th International Conference “Deformation and Destruction of Materials and Nano-Materials”. – 2017. – P. 724–725.
2. Zhuravlyov L. G., Filatov V. I. Fizicheskie metody issledovaniya metallov i splavov: Uchebnoe posobie dlya studentov metallurgicheskikh spetsialnostei [Physical methods of studying metals and alloys: Study manual for students of metallurgical disciplines]. – Chelyabinsk : YUUrGU publishers, 2004. – 157 p.
3. Materialovedenie: Uchebnik dlya vuzov [Material Science: University textbook] / B. N. Arzamasov, V. I. Makarova, G. G. Mukhin et al. / ed. by B. N. Arzamasov, G. G. Mukhin ; 8th edition, stereotyped. – Moscow : N. E. Bauman MSTU publishers, 2008 – 648 p. : illustrated.
4. Zhuravlyov V. N., Nikolaeva O. I. Mashinostroitelnye stali: Spravochnik [Machine-building steels: Reference Guide] / 4th edition, revised and expanded. – Moscow : Mashinostroenie, 1992. – 480 p.

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА ПРИ УСЛОВИИ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО НАГРЕВА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ

Привалова В. В.^{а)}, Просвиряков Е. Ю.^{б)}

*Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}valentprival@gmail.com; ^{б)}evgen_pros@mail.ru*

В работе рассматривается задача влияния температуры на распределение гидродинамических полей при движении бесконечного горизонтального слоя вязкой несжимаемой жидкости. Для описания движения используются уравнения Навье–Стокса в приближении Буссинеска [1, 2].

Поле скоростей задается двумя компонентами: вертикальной и горизонтальной. Обе компоненты полиномиально зависят от толщины слоя жидкости (поперечной координаты). Дополнительно в выражение горизонтальной компоненты скорости включена линейная зависимость от продольной координаты слоя жидкости. Поля давления и температуры представляют параболические функции от продольной координаты с коэффициентами, зависящими от вертикальной координаты [3–6]. Такое решение обобщает класс точных решений для скоростей линейно растущих по горизонтальным координатам, который систематически начал изучаться Линем для задач магнитной гидродинамики в [7], хотя уже Эйлер использовал представление (2) для скоростей, описывающих движение газов [8]. В обзоре [9] приведен подробный анализ точных изотермических решений.

Краевая задача включает в себя условия прилипания и параболического нагрева на нижней твердой границе слоя жидкости, а также задание нулевой температуры, постоянного давления и ветра на верхней проницаемой границе.

Проведенный анализ полученного решения показал, при каких условиях возможно возникновение областей противотечения и застойных точек в рассматриваемом слое жидкости.

В статье приведено новое точное решение, описывающее плоское конвективное движение Куэтта вязкой несжимаемой жидкости. Осуществляется подогрев только нижней границы слоя жидкости по квадратичному (параболическому) закону. Показано, что возникновение областей противотечения вызвано именно ненулевым изменением температуры по продольной координате на нижней границе слоя вязкой несжимаемой жидкости. Проведенный анализ решений применим для исследований потоков жидкости в тонких слоях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – Москва : Наука, 1972. – 392 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. – 6-е. изд. – Москва : Физматлит, 2006. – 736 с.
3. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Плоская линейная конвекция Бенара-Рэлея при квадратичном нагреве верхней границы слоя вязкой несжимаемой жидкости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – Т. 71 (2). – С. 69–75.
4. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное неизотермическое течение Куэтта. Квадратичный нагрев верхней границы слоя жидкости // Нелинейная динамика. – 2016. – Т. 12 (2). – С. 167–178.
5. Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное конвективное течение Куэтта–Хименца при квадратичном нагреве нижней границы слоя жидкости // Нелинейная динамика. – 2018. – Т. 14 (1). – С. 69–79.

6. Lin C. C. Arch. Note on a class of exact solutions in magneto-hydrodynamics // Rational Mech. Anal. – 1958. – Vol. 1. – P. 391–395.
7. Аристов С. Н., Князев Д. В., Полянин А. Д. Точные решения уравнений Навье–Стокса с линейной зависимостью компонент скорости от двух пространственных переменных // ТОХТ. – 2009. – Т. 43 (5). – С. 547–566.

КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ТИПА КУЭТТА-ПУАЗЕЙЛЯ С УЧЕТОМ КВАДРАТИЧНОГО НАГРЕВА ОДНОЙ ГРАНИЦЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ

Привалова В. В.^{а)}, Просвиряков Е. Ю.^{б)}

*Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}valentprival@gmail.com; ^{б)}evgen_pros@mail.ru*

В работе предложено точное решение, описывающее градиентное течение типа Куэтта–Пуазейля в бесконечном горизонтальном слое вязкой несжимаемой жидкости [1–6]. Горизонтальная компонента скорости предложенного точного решения задается в виде линейной функции продольной (горизонтальной) координаты с коэффициентами, зависящими от поперечной (вертикальной) координаты [7–14]. Вертикальная компонента скорости полагается зависящей только от поперечной координаты [7–14]. Поля давления и температуры задаются неполной квадратичной формой по продольной координате с коэффициентами, зависящими от поперечной (вертикальной) координаты [7–10, 13, 14]. С одной стороны, слой жидкости ограничен твердой поверхностью, на которой в краевой задаче задаются условия прилипания и параболический нагрев. С другой стороны, жидкость ограничена свободной проницаемой поверхностью. На этой поверхности определяются поле скоростей в виде параболического ветра, поле давления с ненулевым значением коэффициента поверхностного продольного градиента давления и нулевое (отсчетное) значение температуры. Проведен анализ полученного точного частного решения, получены условия существования застойных точек в слое жидкости, показаны области возникновения противотечений в зависимости от изменения значений коэффициента поверхностного продольного градиента давления.

Исследовано влияние значения коэффициента продольного градиента давления, заданного на верхней границе слоя жидкости на вертикальную компоненту скорости, а следовательно, на характер движение жидкости на свободной поверхности слоя жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – Москва : Наука, 1972. – 392 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. – 6-е. изд. – Москва : Физматлит, 2006. – 736 с.
3. Медведев А. Е. Нестационарное движение вязкой несжимаемой жидкости в трубке с деформирующейся стенкой // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54, вып. 4 (320). – С. 45–54.
4. Тверье В. М., Гладышева О. С. Биомеханическая модель молочной железы // Master's Journal. – 2013. – Вып. 2. – С. 240–252.
5. Гавриленко С. Л., Васин Р. А., Шилько С. В. Метод описания течения и определения реологических констант вязкопластических биоматериалов. Ч. 1 // Российский журнал биомеханики. – 2002. – Т. 6 (3). – С. 92–99.
6. Вычисление первых собственных чисел краевой задачи гидродинамической устойчивости течения Пуазейля в круглой трубе / В. А. Садовничий, В. В. Дубровский, С. И. Кадченко, В. Ф. Кравченко // Дифференциальные уравнения. – 1998. – Т. 34 (1). – С. 50–53.
7. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Плоская линейная конвекция Бенара–Рэлея при квадратичном нагреве верхней границы слоя вязкой несжимаемой жидкости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – Т. 71 (2). – С. 69–75.
8. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное неизотермическое течение Куэтта. Квадратичный нагрев верхней границы слоя жидкости // Нелинейная динамика. – 2016. – Т. 12 (2). – С. 167–178.

9. Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное конвективное течение Куэтта при линейном нагреве нижней границы слоя жидкости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – Т. 71 (5). – С. 148–153.
10. Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное конвективное течение Куэтта–Хименца при квадратичном нагреве нижней границы слоя жидкости // Нелинейная динамика. – 2018. – Т. 14 (1). – С. 69–79.

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ БЕНАРА–РЭЛЕЯ С УЧЕТОМ КВАДРАТИЧНОГО НАГРЕВА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ

Привалова В. В.^{а)}, Просвиряков Е. Ю.^{б)}

*Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}valentprival@gmail.com; ^{б)}evgen_pros@mail.ru*

Найдено новое точное решение двумерных уравнений Обербека–Буссинеска [1–2]. Полученные аналитические выражения гидродинамических полей описывают конвективное течение Куэтта [3–6]. Течение жидкости возникает при неоднородном распределении скоростей и квадратичного источника тепла на верхней границе бесконечного горизонтального слоя вязкой несжимаемой жидкости [3–6]. Нижняя граница рассматриваемого слоя жидкости полагается абсолютно твердой, верхняя граница – свободной, проницаемой. При нахождении точного решения уравнений Обербека–Буссинеска вводится параметр геометрической анизотропии как отношение характерных вертикального и горизонтального размеров для рассматриваемого слоя жидкости и нормированная на толщину слоя вертикальная переменная.

Полученные компоненты поля скоростей содержат влияние двух потоков. Первый из них возникает из-за нагрева верхней границы слоя жидкости, второй вызван заданием скорости движения жидкости на верхней границе.

Для решения краевой задачи на нижней границе слоя жидкости задается условие прилипания и постоянная температура, а на верхней границе ненулевые скорости, характерные для течения Куэтта, постоянное поле давления и нагрев.

Проведен анализ полиномиальных решений, описывающих естественную конвекцию жидкости. Показано существование точек, в которых гидродинамические поля обращаются в нуль внутри слоя жидкости. Таким образом, приведенный класс точных решений позволяет описать противотечения в жидкости и расслоения полей давления и температуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – Москва : Наука, 1972. – 392 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. – 6-е изд. – Москва : Физматлит, 2006. – 736 с.
3. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Плоская линейная конвекция Бенара–Рэля при квадратичном нагреве верхней границы слоя вязкой несжимаемой жидкости // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2015. – Т. 71 (2). – С. 69–75.
4. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное неизотермическое течение Куэтта. Квадратичный нагрев верхней границы слоя жидкости // Нелинейная динамика. – 2016. – Т. 12 (2). – С. 167–178.
5. Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное конвективное течение Куэтта при линейном нагреве нижней границы слоя жидкости // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2015. – Т. 71 (5). – С. 148–153.
6. Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное конвективное течение Куэтта–Хименца при квадратичном нагреве нижней границы слоя жидкости // Нелинейная динамика. – 2018. – Т. 14 (1). – С. 69–79.
7. Lin C. C. Arch. Note on a class of exact solutions in magneto-hydrodynamics // Rational Mech. Anal. – 1958. – Vol. 1. – P. 391–395.
8. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Об одном классе аналитических решений стационарной осесимметричной конвекции Бенара–Марангони вязкой несжимаемой жидкости // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2013. – Т. 3 (32). – P. 110–118.

9. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9 (4). – С. 140–148.
10. Применение теоретико-групповых методов в гидродинамике. Современные математические модели конвекции / В. К. Андреев, Ю. А. Гапоненко, О. Н. Гончарова, В. В. Пухначев. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
11. Зорич В. А. Математический анализ естествознания. – Москва : МЦНМО, 2008. – 136 с.

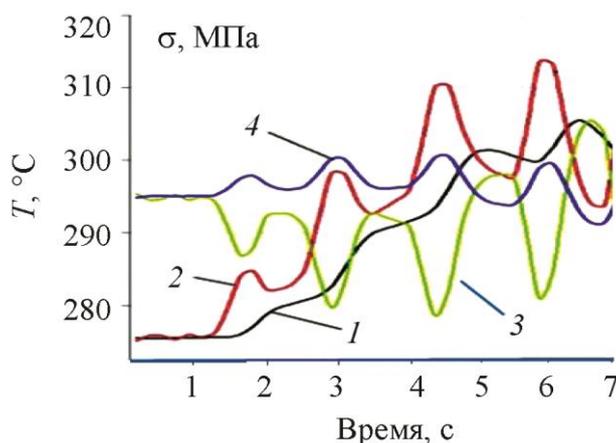
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОБОРУДОВАНИЯ, ПО ДАННЫМ ТЕНЗОИЗМЕРЕНИЙ

Маслов С. В.¹, Кукшинов А. И.²

¹ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
4, Малый Харитоньевский пер., г. Москва, 101990, Российская Федерация,
e-mail: maslovsv@inbox.ru

²Нижегородская инжиниринговая компания «Атомэнергoproject» (филиал),
д. 2, стр. 1, Дмитровское ш., Москва, 127434, Российская Федерация,
e-mail: akukshinov@yandex.ru

В работе рассмотрен метод определения напряженного состояния металла внутренних поверхностей трубопроводов и элементов оборудования атомных и тепловых электростанций. Для решения поставленной задачи в ряде случаев можно использовать результаты, полученные методом натурной тензометрии [1–3]. Для реализации предлагаемого алгоритма необходимо использовать специальную схему расположения измерительных преобразователей на наружной поверхности установки. Для определения параметров теплового потока на внутренней поверхности теплового контура используются тензорезисторы и датчики температуры (термопары), установленные на цилиндрическом участке входного трубопровода, удаленном от зон геометрических неоднородностей и зон концентрации напряжений. Экспериментальные данные, полученные с помощью этих датчиков, используются для решения обратных задач теплопроводности и термоупругости, позволяющих найти диапазоны вариации функций изменения температуры и коэффициента теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности конструкции. Для проверки корректности полученных решений применяются решения прямых задач теплопроводности и упругости, сравниваемые с экспериментальными данными. Для определения напряженного состояния в наиболее опасных точках также используются алгоритмы решения прямых задач с использованием функций, построенных на первом этапе. Верификация корректности проведенного расчета производится путем сравнения полученных расчетных данных с показаниями измерительных преобразователей, установленных в непосредственной близости от опасных точек.



Измеренные и расчетные функции изменения температур и напряжений
в зоне патрубка ПГВ-1000М

На рисунке приведены результаты расчетно-экспериментального анализа напряженного состояния зоны патрубка питательной воды парогенератора ПГВ-1000М атомного реактора ВВЭР-1000, полученные в период эксплуатации. По измеренным температурам (кривая 1) и окружным напряжениям (кривая 4) на наружной поверхности конструкции определены температуры (кривая 2) и окружные напряжения (кривая 3) на ее внутренней

поверхности. Корректность результатов подтверждается совпадением (в пределах погрешности) расчетных и экспериментальных данных.

Литература

1. Михалев Ю. К., Фомин А. В., Маслов С. В. Натурные тензотермометрические исследования напряженно-деформированных состояний оборудования АЭС // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 5. – С. 121–126.
2. Маслов С. В. Расчетно-экспериментальный метод определения напряженно-деформированного состояния термонагруженного энергетического оборудования по данным натурной тензометрии // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 2. – С. 53–62.
3. Разумовский И. А., Чернятин А. С., Фомин А. В. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – № 10. – С. 87–94.

ОЦЕНКИ РЕСУРСА, НАДЕЖНОСТИ И РИСК-АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Москвичев В. В., Чернякова Н. А.

*Институт вычислительных технологий СО РАН,
Красноярский филиал – Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»
53, пр. Мира, Красноярск, 660049, Российская Федерация,
e-mail: krasn@ict.nsc.ru*

Основной тенденцией интенсивного развития объектов техносферы в последние десятилетия является создание уникальных крупногабаритных и наукоемких технических систем (ТС) различного назначения с большим энергетическим потенциалом разрушения. Безопасность эксплуатации таких объектов закладывается на стадиях их проектирования и производства с обеспечением базовых требований по прочности, устойчивости, ресурсу, надежности и живучести и обязательной организацией систем мониторинга и диагностики технического состояния.

Решение проблемы безопасности ТС базируется на ряде положений концепции ненулевого риска аварии:

- 1) возможность возникновения предельных состояний и развития аварийных ситуаций;
- 2) наличие технологической и эксплуатационной дефектности;
- 3) нарушение штатных условий и режимов эксплуатации;
- 4) возникновение чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Данные представления развивают классические подходы, формулировки и критериальную базу методологии конструкционной прочности и несущей способности машин и конструкций на основе современных методов и технологий механики разрушения, экспериментальной механики, технической диагностики и неразрушающего контроля, теории безопасности и риск-анализа.

Представлены результаты решения прикладных задач прочности, ресурса, надежности и риск-анализа различных ТС (сосуды и трубопроводы, резервуары для хранения нефтепродуктов, подъемно-транспортная, экскавационная и горнотранспортная техника, элементы конструкций авиационной и космической техники, гидротехническое оборудование ГЭС).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ТОРСИОНОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Сызранцева К. В.¹, Лобкова Т. Е.¹, Юркевич А. В.²

¹Тюменский индустриальный университет,
38, Володарского, Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: kv.syzr@gmail.com, 451254@mail.ru

²Институт машиноведения УрО РАН,
62, Пролетарская, Курган, 640000, Российская Федерация,
e-mail: urkeva@mail.ru.

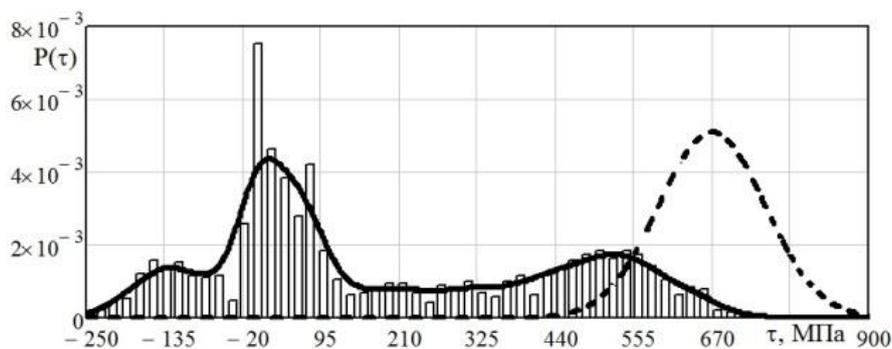
Рассматривается принципиально новый тип механической бесступенчатой передачи с колебательным движением внутренних звеньев, предназначенной для использования в качестве трансмиссии автотранспортного средства (АТС) [1].

Эта передача имеет торсионные валы, которые в эксплуатации работают на кручение в условиях циклического нагружения с частотой, соответствующей частоте вращения вала двигателя. Усталостная прочность торсионных валов может стать ограничением долговечности всей передачи в целом. Случайная природа их нагружения предполагает использование вероятностных методов расчета. В работе предложено использовать для таких расчетов методы компьютерного моделирования случайных величин, основанные на применении математического аппарата непараметрической статистики [2].

На ходовом макете АТС с экспериментальным образцом такой передачи [3] проведены натурные испытания. Получены экспериментальные выборки деформаций (пропорциональны касательным напряжениям τ_i) торциона на характерных режимах движения.

Методика вероятностного расчета прочностной надежности [2], основанная на применении аппарата непараметрической статистики, позволяет восстанавливать фактические функции плотности действующих и предельных напряжений в материале детали, а в соответствии с ними вычислять вероятность безотказной работы, опираясь лишь на данных эксплуатационной выборки. Задача восстановления неизвестной функции плотности распределения $P_\tau(\tau)$ случайной величины касательных напряжений τ , заданной в виде конечной выборки ее значений $\tau_i, i = 1, N$, решается при помощи оценки Парзена–Розенблатта:

$$P_\tau(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot N \cdot h_N^*} \sum_{i=1}^N \exp \left[-0,5 \left(\frac{\tau - \tau_i}{h_N^*} \right)^2 \right].$$



Функции плотности распределения действующих
и предельных касательных напряжений

Предложенная методика реализована в математическом процессоре MathCad. В качестве примера результатов работы разработанной программы на рисунке представлена гисто-

грамма и восстановленная функция плотности распределения напряжений τ_i (сплошная кривая) при наиболее тяжелом «стоповом» режиме работы передачи, а также функция плотности предельных напряжений (пунктирная кривая). Вероятность отказа на этом режиме, вычисленная непосредственным интегрированием, составляет 3,82 %.

Вывод. Реализация предложенного подхода позволяет значительно повысить корректность получаемых оценок надежности торсионных валов.

Работы по исследованию такой передачи были выполнены в рамках грантов РФФИ Урал 01-01-96448, 16-08-00717.

Литература

1. Благодоров А. А. Механические бесступенчатые передачи. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 202 с.
2. Сызранцева К. В. Расчет прочностной надежности деталей машин при случайном характере внешних нагрузок. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. – 88 с.
3. Разработка автоматизированной механической бесступенчатой передачи для мобильных энергоэффективных транспортных и тяговых средств / А. В. Юркевич, В. А. Солдаткин, А. В. Терешин, И. А. Юркевич // ИМТОМ–2018 : материалы IX Международной научно-технической конференции, Казань, 2018. – 2018. – С. 209–213.

НАПОЛНЕННЫЕ ПОЛИАЛЮМОСИЛИКАТЫ В КАЧЕСТВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА АЛЮМИНИЕВЫХ ОСНОВАНИЯХ

Иванов А. А.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
д. 40, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: alexchemtsu@rambler.ru*

Развитие современной техники на базе самых разнообразных функциональных и конструкционных материалов невозможно без создания новых неметаллических неорганических материалов, в том числе на основе как оксидных, так и бескислородных соединений. Острая потребность в материалах, обладающих высокой стабильностью к агрессивным средам, различным излучениям, глубокому вакууму и высоким давлениям, делают эту проблему еще более актуальной. Следует также добавить, что эти материалы во многих случаях должны обладать достаточно высокой плотностью и надежно работать в условиях сложной комбинации силовых и температурных полей.

Классические методы создания диэлектрических покрытий и слоев печатных плат на металлических основаниях в большинстве случаев не обеспечивают изготовление покрытий нужного состава и качества, особенно в тех случаях, когда формирование наноструктурных материалов должно проходить на атомно-молекулярном уровне [1, 2].

Сегодня роль управляемого химического синтеза в процессе формирования и модификации свойств полимерных материалов является определяющей, ибо на стадии синтеза закладываются наноразмерные, фазовые, структурные и другие особенности, определяющие физические, механические, химические и эксплуатационные свойства покрытий. При использовании классических методов синтеза получить наноструктурированные полимерные материалы, обладающие необходимой стехиометрией, гомогенностью, высокой чистотой и определенной микроструктурой, не всегда возможно, тем более когда речь идет о полифункциональных покрытиях.

Трудность формирования гомогенной микроструктуры покрытий классическими методами привела к необходимости разработки новых методов синтеза таких материалов, которые можно осуществить в два этапа: сначала выбрать прекурсоры в качестве исходных соединений, затем применить методы, позволяющие в процессе превращений прекурсоров получить наноразмерные структурные единицы фазы и заданный стехиометрический состав. Получение таких покрытий можно достичь золь-гель-методом, который включает процесс трехмерной поликонденсации гель-прекурсора посредством сшивания металлооксополимерных молекул в растворах (химически контролируемая поликонденсация).

В качестве прекурсоров в золь-гель-процессах используют мономерные или полимерные соединения, а также прекомпозиаты, включающие требуемые для технологической переработки в конечные продукты. Преимуществом использования прекурсоров является возможность создания нанокомпозитов широкого спектра: наноразмерных волокон и пленочных материалов, керамоматричных композитов, керамических связующих и др.

Цель работы – синтез наноструктурированных полиалюмосиликатных гель-прекурсоров и мономерных порошков-прекурсоров для получения полифункциональных диэлектрических покрытий с заданными свойствами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-11018\19.

Литература

1. Шабанова Н. А. Химия и технология нанодисперсных систем. – Академкнига, 2006. – 309 с.
2. Шевченко В. Я. Исследования в области наномира и нанотехнологий // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3, № 11–12. – С. 36–45.

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА И ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 10КП5

Иванов А. М.¹, Платонов А. А.¹, Троицкий О. А.², Ващенко С. С.¹

¹ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»,
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
1, ул. Октябрьская, Якутск, 677980, Российская Федерация,
e-mail: iam53@mail.ru; platan1963@mail.ru; vss1971@bk.ru

²ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Российская Федерация,
e-mail: oatroitsky@mail.ru

Работа посвящена изучению влияния импульсного тока (ИТ) высокой плотности и циклического нагружения на изменение плотности дислокаций ρ , параметра решетки Δa , области когерентного рассеяния (ОКР) D и микроискажений $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$ в низкоуглеродистой стали 10кп5.

Рентгеноструктурные исследования выполнены на образцах из стали 10кп5 в различных состояниях:

- 1) в исходном состоянии – состояние поставки;
- 2) после обработки импульсным током ($j = 130\div 187 \text{ А}\cdot\text{мм}^{-2}$; $U = 5,9\text{--}6,6 \text{ В}$; $\tau = 15 \text{ мкс}$; $F = 1 \text{ кГц}$, 1 ч);
- 3) после циклических испытаний в $N = 1000$ циклов (отнулевой режим, $\sigma_{\max} = 1,11\sigma_T = 306 \text{ МПа}$).

Температура образца в экспериментах не превысила 323 К.

Установлена различная степень влияния ИТ и циклического нагружения на параметры дефектной структуры и механические свойства.

Обработка образцов импульсами электрического тока приводит к релаксационным процессам дислокационной структуры, в результате чего плотность дислокаций существенно падает. Размеры ОКР в стали существенно зависят от структурной перестройки в стали при воздействии импульсного тока. Размеры ОКР после воздействия ИТ примерно в 1,4 раза увеличиваются по сравнению с исходной крупнозернистой сталью, а после циклических испытаний – в 1,13 раз. Кроме того, за счет воздействия ИТ параметр решетки увеличивается на $4 \times 10^{-4} \text{ \AA}$, что влияет на размер ОКР. Уменьшение микроискажений также может способствовать указанным процессам.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что обработка образцов стали импульсами электрического тока высокой плотности приводит к увеличению ОКР и к одновременному снижению микроискажений. Воздействие циклического нагружения приводит к увеличению ОКР в 3 раза меньше, чем при ИТ. При циклическом нагружении изменение микроискажений такое же, как и при ИТ.

Циклические испытания оказывают значительное влияние на предел текучести, тогда как ИТ практически влияния на него не оказывает.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ КАРБОНИЗИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ

Изюмов Р. И., Чудинов В. С., Свистков А. Л., Осоргина И. В., Пелевин А. Г.

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

Работа посвящена изучению влияния различных видов механических нагрузок на состояние карбонизированных слоев на поверхности полиуретановых образцов [1–3] с помощью атомно-силовой и оптической микроскопии. Интерес представляет способность углеродного слоя сохранять свою структурную целостность в результате действия больших деформаций, а также возможность появления трещин и отслоений в случае недостаточной эластичности и слабой сцепки этого слоя с подложкой необработанного материала. Особое внимание уделяется изучению способности (или неспособности) углеродного слоя сохранять перечисленные эксплуатационные свойства в диапазоне температур, характерных для человеческого тела.

Были исследованы образцы полиуретана двух марок, изготовленных по литьевой и растворной технологии. Карбонизированный слой на поверхности образцов был получен с применением технологии ионно-плазменной обработки в двух режимах (со временем обработки 200 и 1000 с). Каждый образец был подвергнут механическим следующим нагрузкам: 1) разовое растяжение (50 % со скоростью 12,5 %/мин и 100 %/мин); 2) динамические растягивающие нагрузки (частота 1 Гц, амплитуда по деформациям 3 %) в диапазоне температур от 10 °С до 50 °С и скоростью изменения температуры 2,5 град/мин; 3) нажатие на поверхность тупым макроиндентором с усилием 1 Н и 10 Н со скоростью 10 мм/мин.

Исследование поверхности карбонизированного слоя образцов осуществлено методами оптической и атомно-силовой микроскопии. В результате анализа АСМ-сканов был выделен ряд топологических особенностей поверхности образцов. Для контрольных образцов было установлено, что каждый из способов производства и обработки полиуретана формирует характерные поверхностные структуры. Для образцов, подвергнутых механическим испытаниям, были определены характерные типы дефектов. По этим особенностям образцы были разделены на группы, отражающие специфическую реакцию карбонизированного слоя на механическое воздействие. Был определен тип образцов, имеющий наилучшую стойкость к появлению дефектов и искажению структуры поверхности.

Результаты работы можно использовать для подбора наиболее оптимальных параметров изготовления и ионно-плазменной обработки полиуретана, способствующих сохранению целостности поверхностного слоя без разрушения и появления дефектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проекту № 18-19-00574.

Литература

1. Ионная имплантация полимеров / В. Б. Оджаев, И. П. Козлов, В. Н. Попок, Д. Б. Свиридов. – Минск : БГУ, 1998. – 197 с.
2. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers / ed. by D. Fink. – Springer, 2004. – 404 p.
3. Kondyurin A., Bilek M. Ion Beam Treatment of Polymers. Application aspects from medicine to space. – Second Edition. – Elsevier, Oxford, 2014. – 268 pp.

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫХ МАКРООБРАЗЦОВ КРЕМНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ ОБЛАСТЬ ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННОЙ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ, ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНЕ

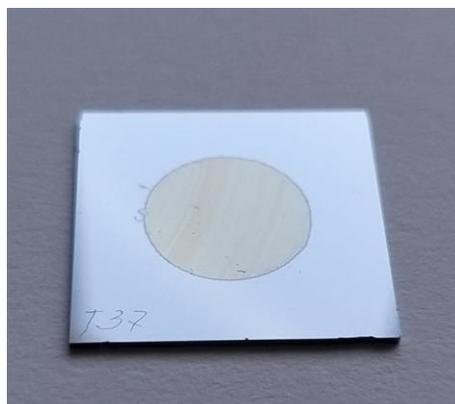
Круковский К. В., Кашин О. А., Романов С. И.,
Бакина О. В., Лотков А. И., Лучин А. В.

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

В настоящее время в медицинской практике используется большое количество различных материалов – металлов и сплавов, полупроводников и диэлектриков, полимеров, керамики. Эти материалы применяются в медицинском приборостроении для изготовления медицинских инструментов, имплантатов, покрытий имплантатов и др.

В онкологии одним из новых и перспективных направлений является использование пористого кремния в качестве контейнерного материала для размещения противоопухолевых лекарственных препаратов. По числу смертей в мире заболевания раком стоят на третьем месте после инфекционных и сердечно-сосудистых заболеваний. Поэтому во всем мире ведутся интенсивные исследования по созданию новых лекарственных препаратов для лечения и профилактики онкологических заболеваний [1]. Надежная методика оценки эффективности новых разрабатываемых противоопухолевых терапевтических препаратов является одним из необходимых условий при разработке стратегии использования этих препаратов для лечения онкологических заболеваний [2]. В настоящей работе при разработке методики оценки эффективности действия лекарств на раковые клетки *in vitro* использовали пористый кремний в качестве носителя противоопухолевых препаратов. Носители лекарств с регулируемой пористой структурой обеспечивают пролонгированное дозированное воздействие лекарств на раковые клетки.

Пористую структуру в кремнии получали методом электрохимического травления. Пористый кремний имеет малую механическую прочность, поэтому была разработана архитектура макрообразца в виде пластины из монокристаллического кремния квадратной формы с размерами 15×15 мм и толщиной 250 мкм. В центре пластины формировали пористую структуру с использованием маски круглой формы (рисунок). При этом цилиндрические поры были ориентированы перпендикулярно плоской поверхности кремниевой пластины, их длина составляла ≈ 170 мкм. Такая архитектура обеспечивала механическую устойчивость образца при дальнейших манипуляциях. Определены технологические параметры электрохимического травления, обеспечивающие получение пористого кремния с диаметром пор в интервале от ≈ 10 до 50 нм при общей пористости 70–75 %.



Макрообразец носителя лекарственных препаратов из пористого кремния

Была проверена возможность использования разработанных образцов в качестве контейнерного материала на примере противоопухолевого препарата доксорубицина. Образцы обладают высокой адсорбционной емкостью. Десорбция доксорубицина при взаимодействии с культуральной средой, содержащей раковые клетки, происходит равномерно в течение длительного времени (до 7 суток).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации через Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (идентификатор проекта RFMEFI60718X0202).

Литература

1. Tikhomirova A. V. Criteria for evaluation of clinical efficacy of anticancer medicines // The Bulletin of the Scientific Centre for Expert Evaluation of Medicinal Products. – 2019. – Vol. 9 (1). – P. 34–40. – DOI: 10.30895/1991-2919-2019-9-1-34-40.
2. Методические указания по изучению противоопухолевой активности фармакологических веществ / Трещалина Е. М., Жукова О. С., Герасимова Г. К., Андропова Н. В., Гарин А. М. – URL: <http://www.oncology.ru/specialist/treatment/preclinical/precl/metod.pdf>

ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ ПОЛУЧЕННЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ ПРИ ВВЕДЕНИИ В СОСТАВ ИСХОДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Попов А. В., Халиман П. А., Носкова Е. В., Комаров О. Н., Жилин С. Г.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
д. 1, ул. Metallургов, г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация,
e-mail: popov.av@protonmail.com*

Актуальной задачей для мирового научного сообщества, обусловленной технологическим прогрессом, является разработка новых материалов и способов их получения. Материалы в зависимости от области их применения, а также конструкции, изготовленные из них, должны обладать уникальным сбалансированным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств, обеспечивающих возможность их использования в критических условиях сложного внешнего воздействия без существенного сокращения долговечности и преждевременной потери работоспособности. При этом технологические процессы получения подобных материалов должны отвечать принципам ресурсосбережения, отличаться простотой исполнения и применения, способствовать сокращению времени технологического цикла, что в конечном счете должно обеспечивать существенное снижение себестоимости получаемой продукции.

Алюмотермия является эффективным методом получения железоуглеродистых сплавов, позволяющим использовать не только химически чистые вещества, но и применять в качестве шихтовых материалов при формировании экзотермических композиций отходы машиностроительных и металлургических предприятий, представляющие собой стружку алюминиевых сплавов и окалину. В зависимости от химического состава основных компонентов термитных смесей формируется химический состав получаемых сплавов. Для корректировки составов сплавов используются различные методы: нагрев термитных композиций до активации реакции, введение в состав смесей различных наполнителей, продолжительная выдержка в тигле перед выпуском металла в форму [1]. В качестве наполнителей используются стружка черных металлов, скрап, ферросплавы, модификаторы, карбонизаторы, сложные соединения химических элементов, металлов и неметаллов, в том числе оксидные [2]. Наполнители влияют на параметры экзотермических реакций, а также на химический состав, структуру и физико-механические свойства получаемых сплавов [3].

Введение в состав термитных смесей шеелитового концентрата, состоящего из $WO_3 = 53-50\%$; $P = 1,7-2,0\%$; $Mo = 0,021\%$; $S = 0,25-0,3\%$; $As \leq 0,005\%$; $SiO = 2-4,6\%$; $CaO = 29\%$, позволяет получать сплавы с высоким содержанием вольфрама. В результате экзотермической реакции, протекающей в термитной композиции с шеелитовым концентратом, в экспериментальных сплавах образуются сложные фазы, содержащие вольфрам, в том числе карбид вольфрама. Такие фазы обеспечивают формирование особой структуры и свойств отливок из экспериментальных сплавов, позволяющих им обладать высокой твердостью, пределом упругости и временным сопротивлением. Отмеченные свойства определяют использование таких сплавов для работы в сложных условиях, в том числе при наличии абразивного износа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-18-50343.

Литература

1. Structure formation on constructional aluminothermic cast elements under conditions of changing process parameters / A. V. Popov, O. N. Komarov, V. V. Predein, S. G. Zhilin // AIP Conference Proceedings. – 2019. – 2176. – P. 020006.

2. Production of ferrotitanium alloy from titania slag based on aluminothermic reduction / Zhenyang Wang, Jianliang Zhang, Zhengjian Liu, Guangwei Wang, Kexin Jiao, Kejiang Li, Tianjun Yang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 810. – P. 151969. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.151969.
3. The Influence of Structure on the Strength Properties of Casting Steel Obtained with the Use of Thermite Materials / O. N. Komarov, S. G. Zhilin, D. A. Potianikhin, V. V. Predein, E. E. Abashkin, A. A. Sosnin, and A. V. Popov // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 785. – P. 040027-1–040027-5.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ИЗ ЭПОКСИДНОГО КЛЕЯ ЭТП-2

Смирнов С. В.¹, Веретенникова И. А.¹, Смирнова Е. О.¹,
Коновалов Д. А.¹, Пестов А. В.²

¹Институт машиноведения УрО РАН,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: irincha@imach.uran.ru

²Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН,
22, Софьи Ковалевской, Екатеринбург, 620137, Российская Федерация

При использовании полимерных материалов в качестве покрытия важна подготовка поверхности к их нанесению. Одним из важных аспектов подготовки поверхности является шероховатость. Увеличение параметров шероховатости может привести как к увеличению, так и к уменьшению прочности соединения. За счет увеличения фактической площади склеивания, уменьшения распространения усталостных трещин, большей диссипации в процессе деформации фрагмента клеевого материала, находящегося непосредственно в микронеровностях, адгезионная прочность увеличивается. При высоких же значениях шероховатости подложки полного растекания клея по всей поверхности на практике не происходит, что может приводить к уменьшению адгезионной прочности. Шероховатость поверхности для пластин из алюминий-магниевого сплава АМг6 сильно влияет на характеристики адгезионного разрушения покрытий. Цель работы – исследование влияния шероховатости подложки на твердость, приведенный модуль упругости и адгезионную прочность эпоксидного клея ЭТП-2. В качестве подложки использовали пластины из углеродистой стали толщиной 3 мм. Было изготовлено четыре варианта подложки со следующими параметрами Ra (средняя шероховатость, рассчитанная для всей измеренной площади): № 1 – 5,685 мкм; № 2 – 0,350 мкм; № 3 – 0,065 мкм и № 4 – 0,042 мкм. Эксперименты по инструментальному индентированию проведены на комплексе NanoTriboindenter TI 950. В качестве характеризующих параметров выбраны микротвердость H и приведенный модуль упругости E_r . Эксперименты на царапание (скретч-тест) проводили с применением универсальной испытательной машины Zwick-2.5. В результате было показано следующее. Шероховатость не влияет на получаемые значения твердости и приведенного модуля упругости, если глубина внедрения намного меньше, чем высота нанесенного покрытия. В случае же тонкого покрытия, когда глубина проникновения индентора сравнима с толщиной покрытия, влияние шероховатости может быть значимым. Характер разрушения одного и того же полимера при царапании, нанесенного на подложки с разной шероховатостью поверхности, значительно отличается. Для царапин образца № 1 наблюдается сначала пластическая деформация покрытия, затем с увеличением глубины внедрения появляются следы хрупкого разрушения, которое в дальнейшем нарастает. Для образца № 2 отслоения и скола не наблюдается даже после того, как индентор движется в материале подложки. Для образцов № 3 и 4 отслоение покрытия при достижении индентором материала подложки наблюдается не для всех царапин, а возникает в 50 % экспериментов. В области царапин наблюдается множество мелких отходящих во все стороны трещин. Значения энергии разрушения для разной шероховатости также значительно отличаются. Таким образом, шероховатость является важным параметром, который необходимо учитывать при нанесении полимерных покрытий.

Эксперименты проведены в Центре коллективного пользования «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН (г. Екатеринбург). Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-19-00571). Образцы для исследований получены при поддержке гранта РФФИ № 16-08-01154.

ТЕРМОВЯЗКОУПРУГАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОГО ИЗДЕЛИЯ

Беляева Н. А.

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

В условиях связанной теории термовязкоупругости рассматривается математическая модель формирования плоской пластины в процессе отверждения полимерной (композитной) среды. Работа является продолжением исследований, выполненных в рамках несвязанной теории [1].

Теорема. Рассмотрим процесс отверждения плоской пластины в неоднородном температурном поле; характеризуемом диссипативной функцией с механической и химической составляющими, обусловленными возникающими в ходе отверждения вязкоупругими напряжениями, деформациями и процессом полимеризации. Предположим: а) постоянство теплофизических параметров c , χ , Q_n уравнения баланса тепла; б) зависимость целевых функций от одной пространственной координаты x и времени t ; таким образом, $T = T(x, t)$, $\vec{V} = (V(x, t), 0, 0)$, $\alpha = \alpha(x, t)$ – температура, вектор скорости и глубина (степень) полимеризации, соответственно; $\sigma'_{ik} = \sigma'_{ik}(x, t)$ вязкоупругий тензор напряжений, определяемый на основе стандартной линейной модели вязкоупругого тела – последовательное соединение среды Гука и Кельвина.

Тогда рассматриваемый процесс описывается системой уравнений [2]:

$$\tilde{n}\rho_0\varepsilon^1\left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right) = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\sigma^2}{\eta} + Q_n \frac{\partial \alpha}{\partial t}; \quad \frac{\partial \alpha}{\partial t} = k_0 \exp[-U/RT](1-\alpha)(\varepsilon_0 + \alpha); \quad (1)$$

$$\sigma(x, t) = E \left[\varepsilon(x, t) - \int_0^t (\lambda - \mu) \varepsilon(x, \tau) \exp(-\lambda(t-\tau)) d\tau \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{\eta} \sigma; \quad (3)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями (теплообмен с окружающей средой).

Лемма. Пусть ρ_0 – начальная плотность материала, тогда в условиях Теоремы плотность в точке x в момент времени t определяется формулами:

$$\rho(x, t) = \rho_0 \cdot \frac{1}{1 + \varepsilon(x, t)}; \quad \varepsilon_1 = \frac{1}{1 + \varepsilon(x, t)}; \quad \rho(x, t) = \rho_0 \cdot \varepsilon_1. \quad (4)$$

Здесь $\varepsilon_x = \varepsilon(x, t)$ – относительное изменение длины элемента, т. е. деформация элемента.

Система (1)–(4) с учетом начальных граничных условий приведена к безразмерному виду. Построен алгоритм и программа численного решения задачи. Проведен широкий численный эксперимент при варьировании параметров задачи. Результаты эксперимента визуализируются графически.

Литература

1. Отчет о научно-исследовательской работе в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме: «НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МЕХАНИКИ», шифр «2010-1.1-112-024-024», № 02.740.11.0618 (итоговый, этап № 6). Наименование этапа: «Отчетный». – М. : ВНИИЦ, 2012. – 46 с. (Инв. № 02301297038).
2. Беляева Н. А. Неизотермическая модель деформирования вязкоупругого материала. Математика в приложениях // Международная конференция в честь 90-летия Сергея Константиновича Годунова, 4–10 августа 2019, Новосибирск, Россия : тезисы докладов. – Новосибирск : Издательско-полиграфический центр НГУ, 2019. – С. 96.

ВОЗМОЖНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С АРОЧНЫМИ ЗУБЬЯМИ

Губарь С. А., Фейгин А. В.

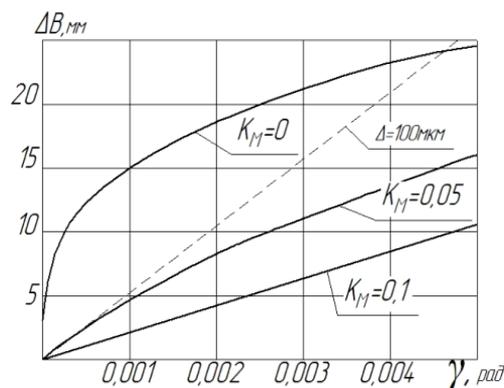
Тихоокеанский государственный университет,
136, Тихоокеанская ул., Хабаровск, 680028, Российская Федерация,
e-mail: gsa1953@mail.ru

Цель предлагаемого доклада состоит в обосновании целесообразности применения цилиндрических передач с арочными зубьями и выработке рекомендаций по их рациональному использованию в зависимости от условий эксплуатации в приводах различного назначения на основе результатов численного анализа геометрии контакта в зацеплении.

Исследуется предложенная профессором М.Л. Ериховым геометро-кинематическая схема образования арочных зубьев, обеспечивающая получение зацепления с уникальными свойствами. В качестве основного инструмента используются спирально-дисковые фрезы.

Задачи исследования геометрии зацепления в работе решаются численными методами с использованием аппарата теории зубчатых зацеплений. Поверхность зуба определяется как огибающая однопараметрического семейства плоской спиральной производящей поверхности инструмента. С учетом особенности контакта (приведенная кривизна в направлении вдоль зуба равна нулю), построена модель рабочего зацепления на основании расчета поля реальных зазоров между контактирующими поверхностями зубьев. При построении модели зацепления учтены возможные погрешности относительного положения зубчатых колес.

В работе показано, что цилиндрические передачи с арочными зубьями без существенных технологических проблем могут быть подвергнуты модификации, изменяющей кривизну выпуклой и вогнутой сторон зубьев. Степень модификации предлагается определять коэффициентом модификации $K_M = \frac{A_W^{602} - A_W}{A_W}$, где A_W – расчетное расстояние между осями инструмента и нарезаемого колеса; A_W^{602} – аналогичное расстояние при обработке вогнутой стороны зуба. Положительная модификация существенно уменьшает чувствительность передачи к погрешностям. Зависимость величины смещения пятна контакта ΔB из средней плоскости колеса от величины перекоса осей зубчатых колес γ при различных значениях модификации приведена на рисунке. Штриховой линией отмечена аналогичная зависимость для прямозубой передачи с продольной модификацией зубьев. Сопоставление кривых свидетельствует о явно меньшей чувствительности к погрешностям модифицированной передачи с арочными зубьями по сравнению с модифицированной прямозубой передачей.



Функции смещения

Интерес представляет вариант зацепления, образованного с отрицательной модификацией, когда при обработке сопряженных поверхностей $A_W^{602} > A_W^{601}$ ($K_M < 0$). Анализ распределения зазоров между контактирующими поверхностями зубьев показывает, что в области

отрицательных значений K_M существует диапазон, в котором в зацеплении могут существовать две линии зацепления, не выходящие на боковые кромки. Можно полагать, что эксплуатационные свойства такой передачи будут сопоставимы со свойствами традиционных шевронных передач.

Таким образом, цилиндрические передачи с арочными зубьями, образованные спирально-дисковыми инструментами, позволяют реализовать варианты зацеплений с широким спектром свойств, применительно к различным условиям эксплуатации.

ПОЛИАЛЮМОСИЛИКАТЫ ДЕНДРИМЕРНОЙ МОРФОЛОГИИ И УСТАНОВЛЕНИЕ ПОЛИКОНДЕНСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ПРОЦЕССЕ ИХ НАНЕСЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ 3D-АЭРОЗОЛЬНОЙ ПЕЧАТИ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ОСНОВАНИЯ

Иванов А. А.¹, Чермошенцева А. С.²

¹*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
д. 40, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: alexchemtsu@rambler.ru*

²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
д. 5/1, ул. 2-я Бауманская, г. Москва, 105005, Российская Федерация,
e-mail: asch-13@ya.ru*

Успешная разработка изделий микроэлектроники и устройств космических аппаратов с длительным сроком активной эксплуатации на базе многофункциональных конструкционных материалов осуществима при условии создания полимерных композиционных материалов нового поколения. При эксплуатации таких изделий главная проблема заключается в отведении тепла. Актуальность создания материалов, обладающих высокой теплопроводностью, устойчивостью к агрессивным средам, высоким температурам и их значительным перепадам, различным излучениям, глубокому вакууму и высоким давлениям, с ростом активности человека становится более востребованной.

Во многих отраслях промышленности в настоящее время, наряду с проблемой создания новых композиционных материалов стоит важная задача их нанесения на поверхность различных изделий и устройств. Так, использование 3D-печати является современным методом формирования различных покрытий и топологий в изделиях и устройствах, в том числе в микроэлектронике.

В настоящее время получение однородных с высокой степенью чистоты наноструктурированных керамических покрытий заданной микроструктуры, обладающих высокой теплопроводностью одновременно с рациональной стехиометрией, не всегда возможно. Именно поэтому развитие технологии микропечати сводится к технологиям получения расходных материалов с необходимыми функциональными и конструкционными свойствами, а также тщательному физико-химическому и морфологическому анализу полученных полимерных матриц и их компонентов. Роль управляемого химического синтеза веществ для керамических материалов, из которых можно сформировать многослойные покрытия, является определяющей в решении проблемы, ибо на стадии синтеза закладываются наноразмерные, фазовые, структурные и другие особенности, определяющие физические, механические, химические и эксплуатационные свойства готовых покрытий, предназначенных для изделий микроэлектроники и устройств космических аппаратов с длительным сроком активной эксплуатации в жестких условиях. Эта проблема во многом сводится к синтезу и химической модификации разнообразных функционализированных наночастиц с заданными химическим и фазовым составом и морфологией, а также к изучению поведения таких частиц в исходной матрице и при удалении растворителя из ограниченного объема микрокапли.

В последнее время во всем мире многие высокотехнологичные компании переходят на технологии прототипирования и коммерческого изготовления современных устройств микроэлектроники и космических аппаратов с использованием компьютерного дизайна и микропечати. Так, получение определенного диэлектрического слоя или топологии с заданными теплофизическими и физико-химическими свойствами на определенном участке устройства или изделия невозможно классическими методами с использованием повсеместно применяемых материалов, так как повсеместно используемые в настоящее время неметаллические материалы в значительной мере достигли своего функционального предела.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-11018\19.

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА РАЗМЕР ЗЕРНА В СПЛАВЕ АЦ7НЖ

Старикова У. С.^{1,2}, Соболева Н. Н.^{2,3}, Макаров А. В.^{1,2}, Бродова И. Г.¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: ulstar97@mail.ru

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

³Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

Алюминиевые сплавы используются в самых разных отраслях машиностроения, а также для изготовления деталей, работающих под действием высоких нагрузок при температурах до 150–200 °С, например детали летательных аппаратов, автомобилей и других транспортных средств. Это вызвано хорошим сочетанием технологических и механических свойств при малом весе. В МИСиС был разработан новый алюминиевый сплав АЦ7НЖ – никалин, содержащий в составе 7,22 % Zn; 2,95 % Mg; 0,52 % Ni; 0,6 % Fe; 0,2 % Z [1]. Он обладает высокой прочностью, его обработка преимущественно заключается в закалке, старении, прессовании/деформировании [2]. Лазерная обработка материалов обладает рядом преимуществ, в частности создает метастабильные пересыщенные твердые растворы в процессе проведения закалки [3]. Лазерная закалка деформируемых алюминиевых сплавов вызывает плавление материала и, вследствие высоких скоростей охлаждения расплава приводит к неравновесной кристаллизации, создавая аномальные дисперсные структуры повышенной прочности.

Цель работы – изучение влияния лазерной обработки на размер зерна, твердость и фазовый состав поверхностного слоя слитка сплава АЦ7НЖ.

Лазерная обработка (закалка) проводилась с использованием волоконного (иттербиевого) лазера, длина волны которого равна 1,07 мкм. Закалка была проведена с такими постоянными величинами, как скорость ($v = 2$ м/мин), фокусное расстояние ($f = 865$ мм), диаметр пятна ($d = 7$ мм), а также с переменной величиной мощности излучения ($P = 5,0 \dots 6,5$ кВт).

В ходе работы было установлено, что лазерная обработка значительно влияет на размер зерна алюминиевого сплава АЦ7НЖ. Размер зерна исходного образца составляет 380 мкм. После проведения лазерной закалки размер зерна вблизи поверхности во всех рассматриваемых случаях стал меньше 7 мкм. Также было установлено, что повышение мощности лазерного излучения способствует небольшому росту зерен в поверхностном слое образцов в связи с разной степенью перегрева расплава. Определены зависимости толщины и фазового состава оплавленного слоя от мощности лазера. Кроме того, после лазерной обработки при высокой мощности формируются термические трещины, связанные с возникновением термических напряжений при быстром и неравномерном нагреве. В связи с этим можно рекомендовать лазерную обработку такого сплава при относительно небольших значениях мощности, достаточных для оплавления материала.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по теме «Структура» (№ АААА-А18-118020190116-6) и проекта РФФИ № 18-03-00102. Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Высокопрочный сплав на основе алюминия : пат. РФ 2419663 / Белов Н. А., Белов В. Д., Чеверикин В. В., Мишуров С. С. – 2011.
2. Белов Н. А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. – Москва : Издательский Дом МИСиС, 2010. – 511 с.
3. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. Пособие для вузов. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.

ИСПЫТАНИЯ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПО НОРМАЛИ К СЛОЯМ

Адамов А. А.¹, Лаптев М. Ю.²

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

²АО «ОДК-Авиадвигатель», корп. 61,
д. 93, Комсомольский просп., г. Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: laptev-mi@avid.ru

Механические свойства слоистых конструкционных углепластиков (УП) в направлении нормали к слоям (в 3-м направлении) редко определяются для тонкостенных элементов конструкций, но они очень важны для массивных деталей из-за низкой прочности и жесткости в этом направлении (как и межслоевые свойства на сдвиг). Объект экспериментального исследования – различные слоистые УП одиннадцати партий.

Цель работы – отработка оснастки для вклеивания и испытаний образцов слоистых УП в виде прямоугольных параллелепипедов квадратного сечения 25×25 мм и длиной от 20 до 85 мм при растяжении в 3-м направлении, а также проведение испытаний.

По результатам отладки выбран разработанный вариант приклеиваемых стальных захватов с квадратным основанием и направляющей квадратной трубой. Изготовлено 12 пар таких захватов, пригодных для многоразового использования, с зажимными штоками для закрепления в губках захватов испытательной машины.

Для центрирования образцов при вклейке, обеспечения заданного статического поджатия приклеиваемых захватов к образцу в процессе температурной обработки разработан специальный универсальный кондуктор для одновременного вклеивания 6 образцов одинаковой длины.

Испытания 85 образцов с приклеенными захватами при комнатной температуре выполнены на универсальной испытательной машине Zwick Z100SN5A фирмы Zwick/Roell со штатным экстензометром Multisens для измерения осевой деформации.

Определены значения модуля Юнга при растяжении и сжатии по нормали к плоскости слоев. Для образцов, разрушившихся на удалении от захватов, определены значения предела прочности при растяжении в 3-м направлении; для образцов, разрушившихся по границе с приклеенными захватами, определены только нижние оценки предела прочности образцов при растяжении в 3-м направлении. Поэтому для определения предела прочности целесообразно использовать образцы слоистых УП с уменьшенной площадью поперечного сечения в средней рабочей зоне образцов, прикрепленных по торцам к захватам.

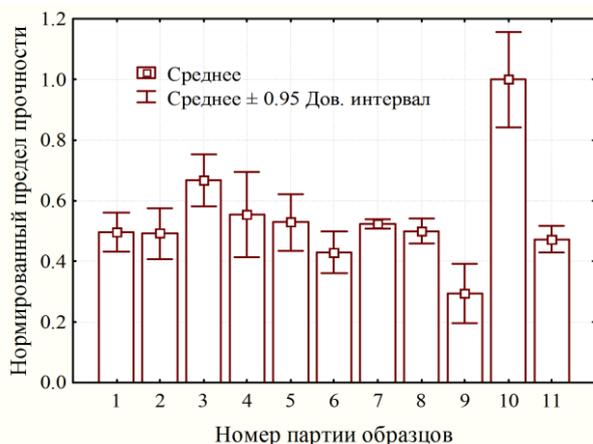


Рис. 1. Диаграммы размаха предела прочности

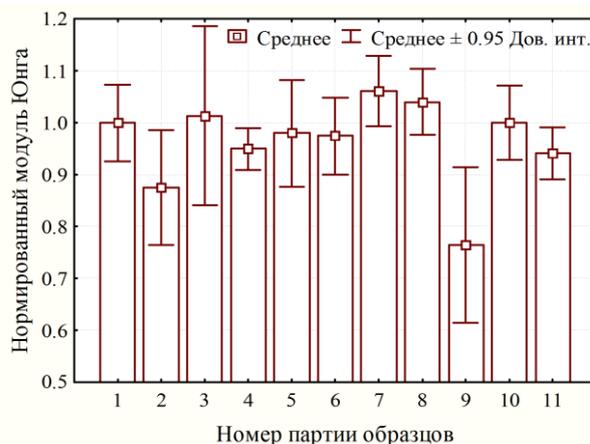


Рис. 2. Диаграммы размаха модуля Юнга

Полученные экспериментальные данные по пределу прочности и модулю Юнга в 3-м направлении всех партий УП обработаны в ППП STATISTICA 6.1, нормированные (к средним значениям свойств партии 10) диаграммы размаха приведены на рис. 1 и 2.

Партия УП 10 статистически значимо превосходит по прочности другие УП при растяжении в 3-м направлении.

ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ В ТЕРМИНАХ СОБСТВЕННЫХ УПРУГИХ СОСТОЯНИЙ

Берестова С. А.

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
19, Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: s.a.berestova@urfu.ru*

Для описания упругих свойств поликристаллического материала с кристаллографической текстурой традиционно используются упругие модули в тензорной (матричной) записи для теоретических изысканий, либо исследователи отдают предпочтение техническим постоянным в случае решения прикладных задач. В решении задачи определения эффективных свойств анизотропных тел открываются новые возможности при представлении упругих свойств в виде спектральных разложений. Спектральные методы используются во многих областях техники для повышения эффективности. Простым примером является использование косинусных преобразований для сжатия данных изображения на экране.

В работе предлагается строгая математическая структура для описания упругих свойств поликристаллического агрегата, позволяющая использовать преимущества спектрального разложения. Обобщенный закон Гука для линейно-упругого анизотропного материала представлен в виде линейного преобразования пространства симметричных тензоров второго ранга самого в себя [1]. В шестимерном пространстве симметричных тензоров выделены так называемые собственные тензоры (по аналогии с собственными векторами линейного преобразования). Они играют особую роль в описании физико-механических свойств поликристалла, задают так называемые собственные упругие состояния, имеющие физический смысл. Именно они выступают в качестве ортонормированного базиса пространства. Элементы тензорного базиса соответствуют шести собственным упругим состояниям. Тензоры напряжений и деформаций в этом базисе представлены в виде спектральных разложений. Тензоры четвертого ранга модулей упругости и коэффициентов податливости также записываем в виде спектральных разложений по диадным произведениям соответствующих базисных тензоров. При этом собственные значения линейного оператора упругости определяют модули упругости аналогично техническим постоянным. Представленные спектральные разложения тензоров второго и четвертого ранга позволяют ввести основанную на алгебраических методах общую схему решения задачи определения эффективных упругих свойств.

В работе более подробно рассмотрены макроскопически-ортотропные поликристаллы с кубической сингонией. Они относятся к классу объемно-изотропных (одно из собственных состояний – всестороннее сжатие) текстурированных материалов. С учетом описанного выше подхода выполнено описание упругого и пластического поведения таких материалов. При этом в явном виде удалось разделить факторы, определяющие анизотропию свойств – физические факторы в виде соответствующих показателей анизотропии монокристаллов, и геометрические факторы в виде конечного числа интегральных характеристик кристаллографической текстуры [2]. Соответствующее изменение анизотропии упругих свойств проиллюстрировано на визуализации трансформации 3D-модели модуля Юнга.

Также рассмотрена концепция потенциального использования предлагаемого описания в области дизайна материалов. Метод может быть распространен на кристаллические агрегаты из нескольких материалов, матричные композиты с включениями различной формы, размера и симметрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 16-08-01154.

Литература

1. Рыхлевский Я. О законе Гука // ПММ. – 1984. – Т. 48 (3). – С. 420–435
2. Ориентационные факторы анизотропии упругих свойств металлов с кубической решеткой / Л. Л. Митюшова, Е. А. Митюшов, Р. А. Адамеску, В. И. Юшков // ФММ. – 1985. – Т. 60 (5). – С. 993–999.

ДИЗАЙН АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Мамылин Д. А., Пургин А. А., Воронцов М. А., Берестова С. А.

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
19, Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: s.a.berestova@urfu.ru*

В последние годы актуально стремление к разработке материалов, соответствующих конкретным целям. В связи с этим бурно развивается новая область научных знаний – дизайн материалов [1, 2]. В основе направления лежит не только изучение взаимосвязей структуры, свойств фаз и эффективных свойств материалов. В работе рассмотрено только проектирование структуры анизотропных материалов. Достаточно сложная проблема проектирования таких материалов с точки зрения технологического процесса в работе не ставится.

По мере накопления огромного потока эмпирических данных о свойствах широкого круга материалов, о связях эффективных свойств со структурой и свойствами составных фаз материала расширяются возможности по выбору материалов, отвечающих требованиям технических рекомендаций. На основе анализа таких баз данных для управления информационным потоком и оптимального выбора материала могут быть использованы современные методы интеллектуального анализа данных, нейронные сети.

Термин «дизайн» материалов означает подбор или оптимизацию состава и структуры материала в соответствии с некоторым заданным критерием. Это могут быть границы для упругих свойств материала, ограничения по пористости материала, по стоимости и пригодности в заданных условиях материала составляющих фаз и др. На первом этапе определяется конструкция, изделие, на которое нацелен численный эксперимент. Осуществляется отбор наиболее значимых параметров, влияющих на эффективные свойства материала. В качестве параметров могут быть выбраны свойства фаз, количество, симметрия, форма и размер включений или пор, ориентация кристаллитов, объемные доли компонент и другие параметры. Проектировщик может быть заинтересован в определенных компонентах тензора упругой жесткости в высоких значениях предела прочности на растяжение или кручение. Конкретный набор параметров определяется выбранным критерием подбора материала. Пространство всевозможных потенциальных материалов задается путем перечисления всех возможных микроструктур. Это пространство может быть простым. Например, набор возможных объемных долей для двух составляющих фаз. В общем случае размерность пространства зависит от количества параметров, используемых для определения эффективных свойств. Для наглядного представления приводятся некоторые подпространства области всевозможных состояний материала.

Дизайн материалов стал возможным ввиду наличия соотношений, связывающих свойства фаз, структуру материала и эффективные свойства. Точных решений – единицы, но в мировой науке достаточно много приближенных соотношений, выражений для границ констант, задающих эффективные свойства материала, что создает огромный потенциал для новой структуры материала. Найдены некоторые наборы материалов, комбинации структур и просчитаны эффективные свойства спроектированных материалов, относящихся к конкретной инженерной задаче изготовления медицинских имплантатов. Определена соответствующая поставленной задаче оптимальная структура материала. Несмотря на полученную оптимальную структуру, нет гарантии, что такой материал может быть изготовлен с помощью известного способа технологической обработки. Следовательно, необходимо предлагать ряд материалов, обладающих одним и тем же набором эффективных свойств для осуществления выбора физически реализуемых структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-08-01154.

Литература

1. Lobos M., Bohlke T. Materials design for the anisotropic linear elastic properties of textured cubic crystal aggregates using zeroth-, first- and second-order bounds // Int. J. Mech. Mater. Des. – 2015. – Vol. 11. – P. 59–78. – DOI: 10.1007/s10999-014-9272-z.
2. Adams B. L., Kalidindi S. R., Fullwood D. T. Microstructure Sensitive Design for Performance Optimization. – Waltham, MA : Butterworth–Heinemann, 2013. – 86 p.

ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В КЕРАМИЧЕСКОМ КОМПОЗИТЕ

Микушина В. А.^{1,2}, Смолин И. Ю.^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, Академический пр., Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: mikushina_93@mail.ru

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, Ленина пр., Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: smolin@ispms.ru

Разработка и оценка механических свойств керамических композитов является важной задачей современного материаловедения. Керамические композиты широко применяются в различных областях промышленности благодаря своим свойствам. Так, например, керамический композит «оксид алюминия – диоксид циркония» обладает необходимым комплексом физических и химических свойств, чтобы использовать его в медицине в качестве материала для создания имплантатов. Хорошо известно, что добавление нестабилизированного циркония к оксиду алюминия приводит к повышению вязкости разрушения, а следовательно, и улучшению прочностных свойств [1, 2]. Поэтому такой тип керамических композитов вызывает особый интерес.

В работе было проведено численное исследование диссипативных процессов при деформации и повреждении пористого керамического композита «оксид алюминия – диоксид циркония». Моделирование проводилось в двумерной постановке в условиях одноосного сжатия. Процессы деформации и разрушения исследуемого композита моделировались с использованием определяющих соотношений изотропной упруго-хрупкой повреждаемой среды [3]. Используемые определяющие уравнения учитывали накопление повреждений, вызывающих деградацию упругих модулей. Для описания процесса разрушения использовались два локальных критерия разрушения по предельным значениям: 1) поврежденности и 2) растягивающего (отрицательного) давления. Эти критерии соответствуют двум различным механизмам разрушения.

В ходе выполнения численного моделирования были проанализированы картины разрушения в пористом керамическом композите с многоуровневой структурой при сжатии на различных этапах деформирования и макроскопическая σ - ϵ диаграмма, а также изучено изменение энергии с ростом деформации образца.

Анализ полученных результатов показал, что с ростом микроповреждений в исследуемом образце происходит увеличение кинетической энергии, а потенциальная энергия замедляет свой рост и затем начинает стремительно падать. При развитии массового разрушения начинает уменьшаться и полная энергия системы. Также можно отметить, что микроповреждения начинают зарождаться в матрице композита, которая является менее прочной. С ростом деформации повреждения накапливаются и распространяются не только в матрице, но и во включениях композита вдоль оси нагружения, формируя трещины.

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ и в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., направление III.23 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 18-35-00224..

Литература

1. Влияние добавок наноразмерного ZrO_2 и технологических параметров процесса прессования на свойства композитов на основе Al_2O_3 и ZrO_2 / О. Ю. Задорожная, О. В. Тиунова, А. А. Богаев, Т. А. Хабас, Ю. К. Непочатов, А. В. Шкодкин // Новые огнеупоры. – 2013. – № 10. – С. 21–26.
2. Wakily H., Mehrali M., Metselaar H. S. C. Preparation of Homogeneous dense composite of zirconia and alumina (ZTA) using colloidal filtration // Engineering and Technology. – 2010. – № 4. – P. 140–145.
3. Микушина В. А., Смолин И. Ю. Численное моделирование деформирования и разрушения пористой алюмооксидной керамики на мезоуровне // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. – 2019. – № 58. – С. 99–108.

БЕЛЫЙ СЛОЙ – ИНИЦИАТОР ТРЕЩИН НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСАХ

Жаворонкова Е. Ю.¹, Сарычев В. Д.², Громов В. Е.³

¹Сибирский государственный индустриальный университет,
Кирова 42, Новокузнецк, 654079, Российская Федерация,
e-mail: katerina.zhavoronkova@mail.ru

²Сибирский государственный индустриальный университет,
Кирова 42, Новокузнецк, 654079, Российская Федерация,
e-mail: sarychev_vd@mail.ru

³Сибирский государственный индустриальный университет,
Кирова 42, Новокузнецк, 654079, Российская Федерация,
e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

В работе проанализировано формирование белого слоя при длительной эксплуатации дифференцированных закаленных 100-метровых рельсов производства «Евраз ЗСМК».

Белый слой – это наноструктурное покрытие, которое формируется при сверхвысоких пластических деформациях, реализуемых, например, при длительной эксплуатации рельсов из перлитной стали [1].

Свойства белого слоя обуславливают трещины на железнодорожных полотнах. Перечислим его основные свойства:

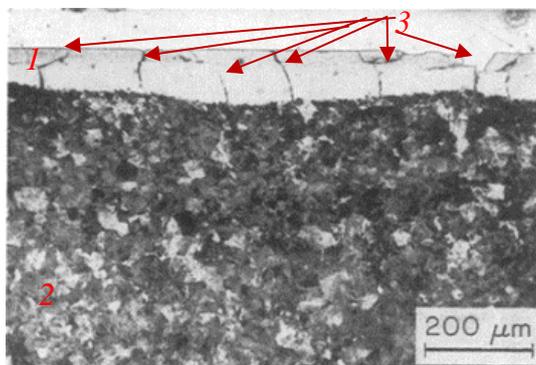
1) химический состав белого слоя близок к основному материалу рельса, т.е. никакой химической реакции при его образовании не происходит;

2) нанокристаллическая структура с размером минимального структурного элемента порядка 10–20 нм, средний размер зерна находится в диапазоне от 30 до 500 нм;

3) твердость (по Кнупу) $12,85 \pm 0,80$ ГПа, что примерно на 25 % выше, чем у самых твердых мартенситных структур (10,28 ГПа);

4) тонкий слой, который противостоит травлению [2].

Белый слой – инициатор трещин на железнодорожных рельсах (рисунок).



Белый слой на рельсах: 1 – белый слой; 2 – подповерхностный материал;
3 – трещина

Трещины на поверхности рельсов начинают образовываться на ранних стадиях их эксплуатации, как и белый слой. Большинство трещин полностью содержится в белом слое. С увеличением степени прокатки рельса степень и глубина белого слоя уменьшились, равно как и количество коротких трещин, потому что некоторые частицы белых слоев откололись и удалились вместе с трещинами, которые были внутри него. В то же время увеличилось количество более длинных трещин их и максимальная глубина. В результате шлифования были удалены все трещины с поверхности рельса, тогда как в нижнем рельсе остались многочисленные трещины глубиной до 0,25 мм.

Таким образом, из-за белого слоя возникают короткие трещины на начальных этапах срока службы рельсов. Объясняется образование трещин высокой твердостью белого слоя.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ 19-32-60001.

Литература

1. Формирование нанослоев за счет развития гидродинамических неустойчивостей при внешних электрических воздействиях / В. Д. Сарычев, В. Е. Громов, С. А. Невский, А. И. Низовский, С. В. Коновалов // *Материаловедение. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2016. – Т. 59 (10). – С. 679–687.
2. Сарычев В. Д., Жаворонкова Е. Ю., Кормышев В. Е. Механизм формирования поверхностных наноструктурных и аморфных слоев при интенсивной пластической деформации : сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. А. В. Гадюкиной. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 9. – С. 263–266.

К ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

Черепанов А. Н., Дроздов В. О., Мали В. И., Видюк Т. М.

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН

Проведены экспериментальные исследования влияния тепловых режимов лазерной сварки и некоторых технологических приемов (промежуточных ставок из монолитного металла, наномодифицирующих добавок) на структуру и механические свойства неразъемного соединения пористых сплавов на основе титана и нержавеющей стали. На основе металлографического анализа сварных соединений установлено, что для получения качественного бездефектного шва необходимо использование промежуточной вставки из компактного металла, размещаемой между торцами свариваемых пластин с некоторой прибыльной частью для компенсации инфильтрации металла в пористые материалы. При этом положение фокального пятна следует устанавливать на глубине, равной толщине пластин, т.е. на их нижней поверхности, а лазерный луч направлять на середину вставки. Применение модифицирующих добавок на основе нитрида титана повышает дисперсность и однородность структуры шва, что положительно сказывается на механических характеристиках металла. Выполненные испытания прочности на разрыв показали разрушение сварных образцов только по основному металлу (рис. 1).



Рис. 1. Результаты испытаний на разрыв: *а* – сталь; *б* – титан

Проведены также испытания на изгиб с помощью универсальной машины Zwick/Roel/Z100. Сделан вывод, что сварные соединения допускают воздействие значительных изгибающих моментов (рис. 2).

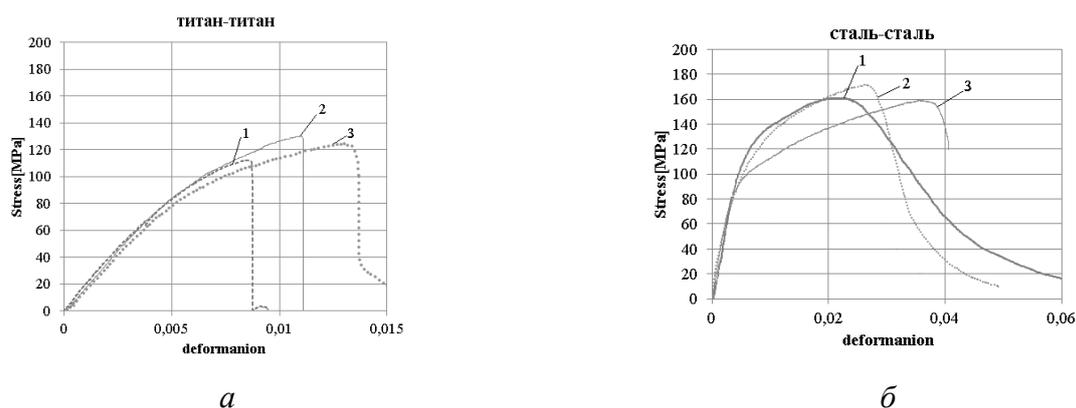


Рис. 2. Диаграммы прочности на изгиб сварных соединений и основного металла после допустимого изгиба: *1* – сварное соединение без НП; *2* – сварное соединение с НП; *3* – основной металл

При этом их прочность на изгиб без НП близка к прочности основного металла, а прочность соединений с НП несколько выше (~ 4–8 %).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-00571.

НАНЕСЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Брусенцева Т. А., Шикалов В. С., Фомин В. М.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
4/1, ул. Институтская, Новосибирск, 630090, Российская Федерация*

Работа посвящена нанесению полимерных порошковых материалов методом холодного газодинамического напыления (ХГН). Предложенный способ нанесения дорожной разметки позволит получить покрытие с высокой износостойкостью, увеличенным сроком службы, которое может эксплуатироваться в различных климатических зонах в интервале температур от -40° до $+40^{\circ}$ C, что позволит заменить водные краски и краски на основе растворителей с наименьшим сроком службы [1–3].

В качестве композитного материала использовался термопластичный состав для маркировки дорожного полотна ТЕРМОПЛАСТИК «WAY» (ГОСТ 52575-2006). Состав содержит пленкообразующее вещество (15–30 %), пластификатор (3–10 %), двуокись титана (4–10 %), антиседиментационную добавку (3–10 %), стеклянные микрошарики (0–30 %) и минеральный наполнитель. В качестве материала подложки использовали дорожное полотно с асфальтобетонным покрытием.

Эксперименты по напылению проводились на установке холодного газодинамического напыления (ИТПМ СО РАН), которая состоит из нагревателя рабочего газа, дозатора порошка барабанного типа и форкамерно-соплового блока. Оборудование позволяет поддерживать необходимые параметры эксперимента (давление и температуру торможения воздуха) с высокой точностью (1 К по температуре и 0,01 МПа по давлению). В качестве системы позиционирования использовали промышленный 6-осевой робот KR16-2 (КУКА, Германия), что позволило с высокой точностью позиционировать (0,01 мм) и перемещать (1 мм/с) сопло относительно подложки. Напыление осуществлялось при помощи эжекторного сопла постоянного сечения диаметром 15 мм и длиной 140 мм.



Дорожки напыления на поверхности асфальтобетона, полученные при температурах рабочего воздуха 300 К (слева) и 433 К (справа)

Эксперименты показали (рисунок), что увеличение температуры рабочего воздуха с 300 до 433 К позволяет повысить коэффициент напыления покрытия с 0,02 до 0,05. Таким образом, применение современных материалов и способов нанесения дорожной разметки позволит понизить стоимость автомобильных дорог и повысить безопасность движения. Использование ХГН для напыления термопластика на дорожное полотно позволит увеличить срок службы покрытия, это связано с заметным утолщением слоя материала, используемого для разметки. Кроме того, данный вид нанесения разметки менее затратный по времени благодаря полностью механизированному процессу, что позволит заменить белую эмаль АК-511, применяемую в настоящее время, на современные долговечные материалы с улучшенными техническими свойствами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 16-31-00135_мол_а.

Литература

1. Cold Spray Technology / A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, V. Fomin. – Elsevier Science, 2007. – 336 p.
2. Белов В. Д. Основные положения методических рекомендаций по разметке автомобильных дорог // Дороги России XXI века. – 2005. – № 2. – С. 55–60.
3. Brusentseva T., Shikalov V., Fomin V. Cold spray deposition of thermoplastic powder for road marking // XXVI Conference on Numerical Methods for Solving Problems in the Theory of Elasticity and Plasticity (EPPS-2019), Tomsk, Russia, June 24–28, 2019. – EPJ Web Conf., 2019. – Vol. 221. – P. 01006. – DOI: 10.1051/epjconf/201922101006.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

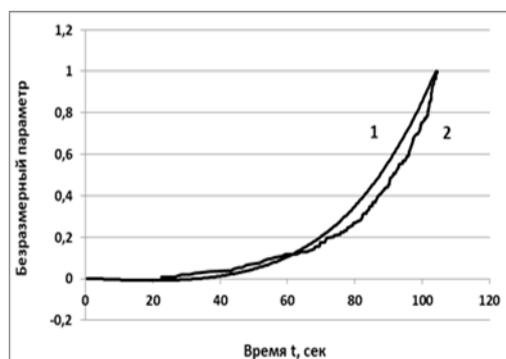
Северов П. Б.

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
д. 4, Малый Харитоньевский переулок, Москва, 101000, Российская Федерация,
e-mail: alpinprom@yandex.ru

В докладе с позиций методологии неупругого деформирования и разрушения твердых тел и сред в процессе их эволюции [1], развиваемой в институте физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск), рассмотрены результаты экспериментальных исследований накопления повреждений методом акустической эмиссии (АЭ) в образцах с концентраторами напряжений (центральные отверстия) из конструкционных слоистых углепластиков с типовой симметричной укладкой $[0^{\circ}/0^{\circ}/\pm 45_2^{\circ}/0_2^{\circ}/90^{\circ}/0_2^{\circ}/\pm 45_2^{\circ}/0^{\circ}]_s$ при квазистатическом растяжении с постоянной скоростью перемещения активного захвата. Исследования проводились в ИМАШ РАН (Москва) на электросервогидравлической установке INOVA ИК-6033 (диапазон усилий ± 200 кН) с использованием измерительного модуля NI 9219 (программирование в среде LabVIEW) и АЭ оборудования фирмы ИНТЕРИЮНИС.

Цели работы: 1) определение уровня напряжений для предварительно нагруженного образца, при котором начинается акустическая эмиссия; 2) сравнение накопления повреждений единообразно нагружаемых одинаковых образцов при различном времени пребывания их в напряженном состоянии до разрушения; 3) построение кривых степени целостности образцов (от 1 до 0) в зависимости от уровня приложенных усилий (напряжений) [2, 3].

Возможность изучения накопления механических повреждений материала методом АЭ обоснована корреляцией рассеяния механической энергии при нагружении модельного углепластикового образца с накоплением доли рассеиваемой энергии, содержащейся в АЭ-импульсах (рисунок) [3].



Рассеяние механической энергии (1) и накопление энергии АЭ импульсов (2)

Для каждого из образцов представлены диаграммы нагружения $\sigma = f(t)$; распределения во времени энергий АЭ-импульсов; накопление энергий АЭ-импульсов в зависимости от напряжения; перестроенные диаграммы нагружения $t = f(\sigma)$, позволяющие определить разницу во времени достижения одинаковых уровней напряжений; кривые степени целостности образцов в зависимости от напряжения и другие графические материалы.

Выводы. По результатам экспериментальных исследований установлено: 1) достоверность анализа накопления повреждений повышается при обработке массива акустических импульсов с учетом их акустической энергии; 2) акустическая эмиссия возобновляется при напряжениях, несколько меньших по отношению к уровню ранее достигнутого максимального напряжения; 3) уровень напряжений и время пребывания в напряженном состоянии – основные факторы, влияющие на процессы накопления повреждений, они оказывают совместное, равнонаправленное действие по увеличению повреждаемости; 4) кривые степени

целостности образцов позволяют оценить относительный уровень накопленных повреждений в зависимости от уровня приложенных напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 20-58-00019_Бел_а.

Литература

1. Макаров П. В., Еремин М. О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16 (1). – С. 5–26.
2. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. – М. : Изд-во Наука, 1979. – 744 с.
3. Северов П. Б. Оценка механического состояния слоистых углепластиков по акустико-эмиссионному отображению процессов неупругого деформирования и разрушения // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – № 4. – С. 85–92.

КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ МИКРОПОВРЕЖДЕНИЙ В МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ И ПОСЛЕ РКУП-ОБРАБОТКИ

Синев И. О., Белецкий Е. Н., Тютин М. Р., Ботвина Л. Р.,
Рыбальченко О. В., Добаткин С. В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
49, Ленинский пр., Москва, 199334, Российская Федерация,
e-mail: ivan-sinev@yandex.ru*

Кинетика накопления повреждений (множественного разрушения) определяет работоспособность материала элементов конструкций на ранней стадии нагружения, до формирования макротрещины. На этой стадии зарождение и рост поврежденности, определяющейся наличием пор, микротрещин и других дефектов, существенно зависит от структуры материала и его прочностных характеристик.

Одним из распространенных методов повышения прочности материала на этапе изготовления является РКУП-обработка, вследствие которой происходит измельчение зерна и образование ультрамелкозернистой структуры: нанокристаллической (размер зерна $D \leq 100$ нм) или субмикрокристаллической ($100 \text{ нм} \leq D \leq 1$ мкм).

Для исследования влияния РКУП-обработки на кинетику накопления микротрещин были использованы плоские корсетные образцы из стали 20 толщиной 1,5 мм и длиной рабочей части 50 мм. Заготовки диаметром 20 мм и длиной 120 мм, используемые для изготовления образцов, были подвергнуты закалке при температуре 880 °С (в течение 1 ч с последующим охлаждением в воде) и высокотемпературному отпуску при 600 °С. Далее, часть заготовок была обработана методом РКУП при температуре 400 °С. Угол пересечения между каналами составлял 120°, а число проходов равнялось 8, вследствие чего истинная степень деформации составила 5,4. Изготовленные из полученных заготовок образцы (до и после РКУП-обработки) испытывали при статическом нагружении с остановками, в процессе которых при изучении полированной поверхности образца в наиболее опасном сечении методом оптической микроскопии были получены картины множественного разрушения при разных значениях деформации.

Обработка полученных картин поврежденности позволила оценить относительную площадь (S^*), занятую микротрещинами, а также среднюю длину (L_{cp}) и плотность (n) микротрещин на разных стадиях нагружения, после чего был рассчитан модифицированный для плоской поверхности k -параметр, вычисляемый из соотношения $k = 1 / (L_{cp} \cdot \sqrt{n})$ [1, 2].

Изучение деформационных зависимостей исследуемых параметров в образцах без РКУП-обработки выявило непрерывный рост площади поврежденной поверхности S^* до значения 33 % и снижение k -параметра на протяжении всего испытания. Анализ накопления микроповреждений образцов из стали 20 после РКУП-обработки показал, что при достижении параметра S^* порядка 23 % рост площади поврежденной поверхности в шейке исследуемого образца прекращается. Это, вероятно, связано с переходом на новый иерархический уровень накопления дефектов, характеризующийся ростом числа микротрещин, размер которых не превышает 1 мкм. Разрешающая способность оптического микроскопа не позволяет анализировать процесс зарождения и накопления таких дефектов.

По результатам работы будут представлены результаты изучения кинетики накопления поврежденности в образцах из малоуглеродистой стали 20 без РКУП-обработки и после нее, проанализированы зависимости процесса накопления дефектов и сделаны выводы о влиянии РКУП-обработки на исследуемые деформационные зависимости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00674).

Литература

1. Журков С. Н., Куксенко В. С., Слуцкер А. И. Образование субмикротрещин в полимерах под нагрузкой // Физика твердого тела. – 1969. – Т. 11 (2). – С. 296 – 307.
2. Botvina L. R., Soldatenkov A. P. On the Concentration Criterion of Fracture // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2017. – Vol. 39 (4). – P. 477–490. – DOI: 10.15407/mfint.39.04.0477.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО И КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК К ПОРОШКУ ЖЕЛЕЗА НА ВЕЛИЧИНУ ПРЕДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ

Поляков П. А., Поляков А. П.

*Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: smokie84@mail.ru, pap@imach.uran.ru*

Выдавливание порошковых заготовок в холодном состоянии расширяет возможности порошковой металлургии, давая возможность получать изделия, изготовление которых другими способами затруднительно или невозможно. При этом обеспечивается минимум отходов, высокая размерная точность, сокращение или полное устранение механической обработки, лучшие механические свойства, чем у оригинала, из-за благоприятной структуры зерна.

При выборе технологических параметров процесса выдавливания заготовки из некомпактного сырья следует стремиться к минимизации затрат при обеспечении требуемой плотности и физико-механических свойств прутков. Необходимо определить влияние состава порошковой композиции на возможность выдавливания прутка из неспеченной заготовки, пригодного для последующей термомеханической обработки. При этом минимальная плотность заготовки, позволяющая получить пруток, определяется величиной ее предельного сопротивления срезу d .

Для исследования влияния состава порошковой композиции на параметр d , определяемый из условия прочности Мора–Кулона, выбраны составы, полученные механическим смешиванием природно-легированных ванадийсодержащих порошков железа в смеси с Zn, Cu, C с варьируемым количественным и качественным составом. Для изготовления образцов и проведения испытаний на осевое и радиальное сжатие использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН и ЦКП Урал-М ИМЕТ УрО РАН.

В результате определены численные значения параметров критерия прочности Мора–Кулона для исследованных композиций и их зависимость от плотности в экспоненциальной форме. Показано, что добавка графита существенно снижает прочность образцов при радиальном и осевом сжатии и соответственно уменьшает его предельное сопротивление срезу. Показано, что параметр d возрастает с увеличением плотности брикетов, что обусловлено увеличением степени схватывания частиц порошка [2]. При этом для составов с добавками графита и/или цинка параметр d растет медленнее, чем для исходного нелегированного порошка.

Работа выполнена при поддержке ГРАНТА РФФИ № 19-08-00765.

Литература

1. Modeling of powder die compaction / P.R. Brewin et al. – Springer, 2008. – 329 p.
2. Поляков П. А., Залазинский А. Г., Поляков А. П. Исследование процесса выдавливания заготовок из ванадийсодержащего порошка железа // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 12. – С. 10–14.

ПЕРСПЕКТИВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕКСТУРИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Драгошанский Ю. Н.^{а)}, Пудов В. И.^{б)}

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
18, С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}drago@imp.uran.ru; ^{б)}pudov@imp.uran.ru*

При промышленном изготовлении электротехнических изделий из магнитомягких материалов на основе Fe-Si, Fe-Al, Fe-Si-B, Fe-Ni их первично приобретаемые после стандартной обработки магнитные свойства существенно снижаются за счет вносимых деформаций.

В работе рассматриваются перспективы модифицирования этих изделий, в частности в виде магнитопроводов из поликристаллических и аморфных материалов, путем формирования более совершенной кристаллической и доменной структур с поперечной и комбинированной ориентацией намагниченности.

Исследуемые изделия подвергали термомагнитной (ТМО), локально-лазерной (ЛЛО), ионно-лучевой (ИЛО) обработкам, а также высокоэнергетическому воздействию.

Были использованы кольцевые изделия из аморфных сплавов ГМ 501 ($T_c = 140$ °С, толщина ленты $\delta = 0,02$ мм, ширина – 10 мм, диаметр – 30 мм) и $Fe_{81}Si_4B_{13}C_2$, пермаллоя марки 79 НМ ($T_c = 430$ °С; $\delta = 0,01$ мм), а также стержневые трансформаторные магнитопроводы из электротехнической стали (рис. 1 и 2).



Рис. 3. Кольцевой магнитопровод из аморфного сплава

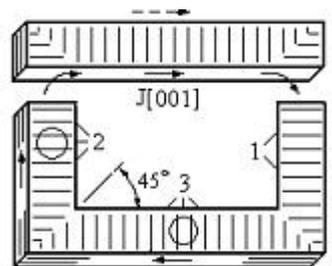


Рис. 2. Шихтованный стержневой магнитопровод

Установлено, что в зависимости от различных режимов обработки можно снизить $R_{уд}$ в 1,3–2,3 раза, уменьшить H_c в 1,4–2 раза и увеличить m в 1,5–2 раза для аморфных материалов (таблица). Формирование двухосной магнитной анизотропии в шихтованных элементах магнитопровода с применением комплекса воздействий на основе локальной лазерной и термомагнитной обработки, обеспечивает снижение магнитных потерь в трансформаторном магнитопроводе на 9–14 % [1–3].

Зависимость магнитных свойств аморфного сплава $Fe_{81}Si_4B_{13}C_2$
после различных видов обработок

Вид обработки	μ_{max}	$P_{1/400} = P_{\Gamma} + P_{В}$ (Вт/кг)
ТО	72 000	2,66 = 1,40 + 1,26
ТО + σ + ЭИП	54 000	1,94 = 1,21 + 0,73
ТО + ТМО	142 000	2,02 = 1,08 + 0,94
ЭИП + ТО + ТМО	94 000	1,65 = 0,95 + 0,70

Примечание. Покрытие TiO + TiN, метод ионно-плазменный.

Литература

1. Пудов В. И., Драгошанский Ю. Н. Магнитная доменная структура и термостабилизация зон лазерного воздействия в магнитомягких материалах // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 52 (2). – С. 252–258.
2. Пудов В. И., Драгошанский Ю. Н. Доменная структура и магнитные потери шихтованных магнитопроводов при лазерной обработке // ФММ. – 2015. – Т. 116 (6). – С. 571–576.
3. Пудов В. И., Драгошанский Ю. Н., Дорошек А. С. Эффективность локальных деформационных воздействий на магнитную структуру элементов магнитопровода // Diagnostics. Resource and Mechanics of materials and structures. – 2018. – Iss. 6. – С.165–172.

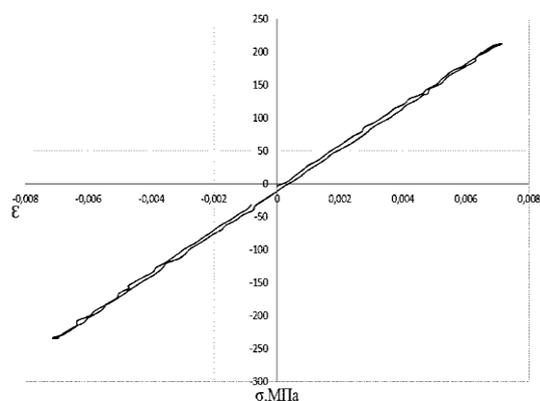
СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ И ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ТИПА «СТАЛЬ–РЕЗИНА»

Гладковский С. В., Недзвецкий П. Д., Вичужанин Д. И., Кутенева С. В.

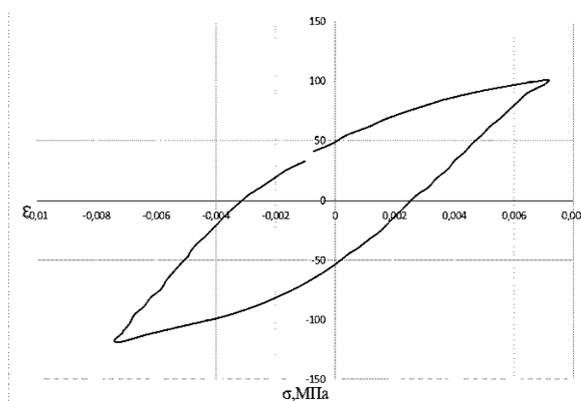
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: gsv@imach.uran.ru

Все более широкое применение в авиакосмической технике, автомобилестроении и транспортном машиностроении в настоящее время находят металлополимерные композиционные материалы, обладающие низкой плотностью, высокой удельной прочностью и хладостойкостью, а также характеризующиеся ярко выраженными вязкоупругими свойствами, что позволяет применять их в качестве вибродемпфирующих элементов в транспортных системах. Значительный практический интерес представляет один из разновидностей металлополимерных композиционных материалов – слоистые композиты типа «Сталь–резина». В связи с этим в работе были изучены характеристики ударной вязкости и определены показатели демпфирующей способности, полученных методом холодного склеивания, 3- и 5-слойных композиционных материалов на основе стали 09Г2С с прослойками из морозостойкой резины 1Ф-1-ТМКЦ-С с объемной долей резиновой составляющей 20 и 30 % соответственно.

Испытания на ударную вязкость, проведенные при температурах +20 и –60 °С на инструментированном маятниковом копре «Tinius Olsen» IT542M по ГОСТ 9454, показали, что при комнатной температуре характеристики ударной вязкости монолитной стали 09Г2С и слоистых композитов имеют близкие значения ($KCV = 0,83–0,87$ МДж/м²). Однако при температуре испытаний –60°С 3- и 5-слойные композиционные материалы превосходят по величине ударной вязкости сталь 09Г2С примерно в 2 раза. Оценка демпфирующей способности образцов стали 09Г2С и 3-слойного композита на ее основе проводилась методом динамомеханического анализа (ДМА) при жестком циклическом знакопеременном растяжении плоских образцов толщиной 10 мм на испытательной машине INSTRON 8801 с частотой нагружения 1Гц, общим количеством циклов $N = 100$ и действующих напряжениях $\sigma \approx 0,2–0,4 \sigma^{0,2}$ (стали 09Г2С). Проведенные циклические испытания 3-слойного композита выявили на кривых циклического нагружения наличие разомкнутой петли механического гистерезиса, свидетельствующей о высокой демпфирующей способности данного материала (рисунок).



а



б

Петли механического гистерезиса при циклическом нагружении образцов стали 09Г2С (а) и слоистого композита «Сталь–резина» (б)

Установлено, что слоистый композит по сравнению со сталью основы обладает более высоким комплексом показателей вибростойкости: тангенса угла механических потерь ($\text{tg}\delta$), компонент комплексного модуля упругости (модуль упругости (E'), модуль вязкости (E'')).

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 12-03-31374 и РНФ № 20-79-00084.

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОГО РЕСУРСА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6 ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ГИГАЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

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

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук,
д. 1, Ак. Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: oborin@icmm.ru*

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей процесса разрушения на различных структурных уровнях алюминиевого сплава АМГ6 в условиях лабораторных экспериментов, максимально соответствующих распространенной в приложениях ситуации – катастрофическому уменьшению прочности элементов авиационных двигателей (лопаток вентиляторов) при случайном высокоскоростном соударении с твердыми частицами и последующем воздействии коррозионной среды.

Экспериментально реализована программа испытаний по динамическому предварительному нагружению специально изготовленных образцов из сплава АМГ6 с последующей реализацией гигациклового нагружения (количество циклов 10^8 – 10^9). Предварительное нагружение образцов осуществлялось динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского при скоростях деформации до $\sim 10^3$ с⁻¹, после чего образцы подвергались циклическим испытаниям (с коэффициентом асимметрии $R = -1$) на испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 (частота нагружения 20 кГц) при обильном воздушном охлаждении сжатым воздухом и соевым туманом (3 % NaCl) с последующим изучением фрактографии изломов.

Обнаружено снижение на 15–25 % предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава АМГ6 с уровня напряжения 162 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 121–138 МПа, соответствующего критическому количеству циклов $\sim 7,5 \cdot 10^8$ при воздушном охлаждении образцов. Отработана методика проведения экспериментов в условиях коррозионной среды на образцах из сплава АМГ6, обнаружено снижение предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава с 70 МПа в исходном (недеформированном) до уровня 50–60 МПа, соответствующего критическому количеству циклов $\sim 4,2 \cdot 10^8$ при охлаждении образцов соевым туманом (3 % NaCl).

В качестве метода количественного анализа для установления корреляций между механическими свойствами и масштабнo-инвариантными характеристиками дефектных структур, формирующихся в процессе гигацикловой усталости для оценки долговечности материалов использовался интерферометр-профилометр New View 5010 высокого структурного разрешения. Исследование роста усталостной трещины в режиме гигациклового нагружения в сплаве АМГ6 показало, что распределение шероховатости рельефа поверхностей разрушения в зоне роста трещины характеризуется признаками статистической автомодельности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-08-01186, 19-48-590009).

ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ СПЛАВА Д16ЧАТВ

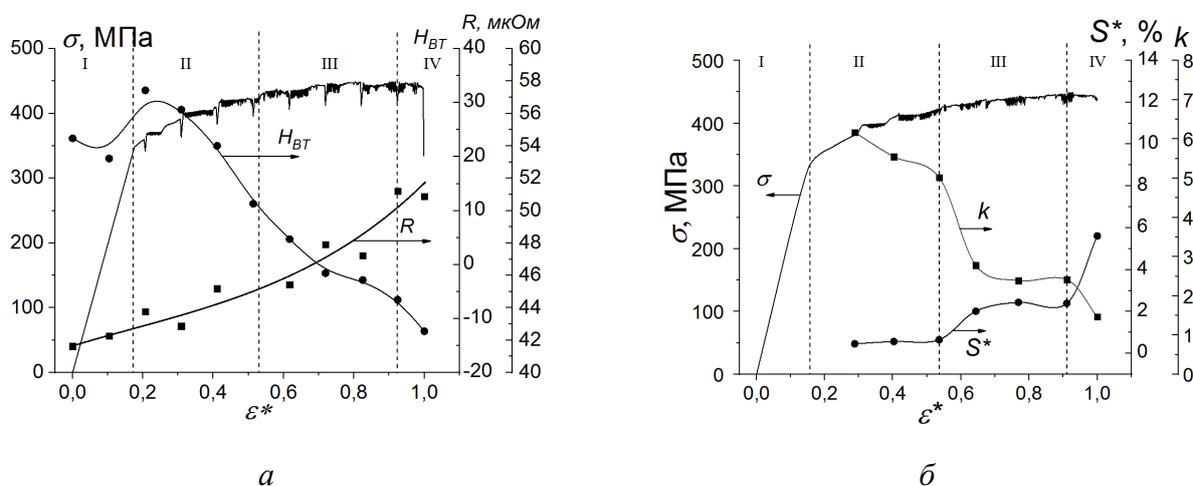
Белецкий Е. Н.¹, Ботвина Л. Р.¹, Тютин М. Р.¹, Левин В. П.¹,
Синев И. О.¹, Кулемин А. В.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
49, Ленинский пр., Москва, 119334, Российская Федерация,
e-mail: enbel@mail.ru

²Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского,
1, ул. Жуковского, Московская обл., г. Жуковский, 140180, Российская Федерация

Кинетический процесс разрушения материала, подвергнутого кратковременному или длительному нагружению, проявляется в значительных изменениях структуры (на разных масштабных уровнях), которые существенно влияют на физико-механические свойства. Для формирования более полного понимания причин этих изменений требуется изучение материала на микроуровне, которое осуществляется благодаря оптической микроскопии.

В качестве исследуемого материала был выбран алюминиевый сплав Д16ЧАТВ, применяемый в авиационной промышленности для изготовления листов обшивки самолетов. Плоские образцы из сплава Д16ЧАТВ размерами 175×30×1,13 мм были испытаны на растяжение со скоростью деформации 1 мм/мин на сервогидравлической установке «BISS» Nano в режиме статического растяжения с остановками для измерения физических параметров. В результате испытаний на растяжение были оценены стандартные механические свойства, а также физические свойства (σ) и критерии поврежденности (δ), оцененные на различных стадиях нагружения при остановках испытательной машины (рисунок).



Кривые деформации и изменения вихретокового параметра H_{BT} и электросопротивления R (а), а также изменения характеристик поврежденности материала – S^* -параметра и k -критерия в функции относительной деформации ϵ^* (б)

В ходе испытаний на поверхности образцов были отчетливо видны следы волн пластической деформации, распространяющихся вдоль образца, возникновение которых отражалось на скачкообразном характере кривой деформации. Вихретоковый параметр снижается с небольшим изменением углового коэффициента при относительной деформации $\sim 0,6$, а электросопротивление монотонно повышается (рисунок а). Аналогичным образом происходит изменение параметров поврежденности (рисунок б). Резкое снижение k -критерия (связанного степенной зависимостью с остаточной долговечностью материала), вычисляемого из соотношения $k = 1/(L_{cp} \cdot \sqrt{n})$ [1, 2], при относительной деформации, близкой 0,6, приводит к увеличению суммарной поврежденности S^* , а при k -критерии, меньшем трех начинается окончательное разрушение образца.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00674).

Литература

1. Журков С. Н., Куксенко В. С., Слуцкер А. И. Образование субмикротрещин в полимерах под нагрузкой // Физика твердого тела. – 1969. – Т. 11 (2). – С. 296 – 307.
2. Botvina L. R., Soldatenkov A. P. On the Concentration Criterion of Fracture // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2017. – Vol. 39 (4). – P. 477–490. – DOI: 10.15407/mfint.39.04.0477.

ОЦЕНКА КЛИНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЦИЕНТОВ С СИНДРОМОМ СТАРЧЕСКОЙ АСТЕНИИ

Акимова А. В., Холманских Е. О., Тхай Ю. Р.,
Шипачева Т. Н., Мазурова М. Л.

Уральский государственный медицинский университет,
д. 3, ул. Репина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация,
e-mail: liza.holmanskih@yandex.ru

Цель исследования. Оценить сопряженность и взаимосвязь данных клинической оценки пациентов с синдромом старческой астении.

Материал и методы. Проведено одноцентровое ретроспективное исследование, включающее 49 пациентов гериатрического отделения ЦГБ № 3 г. Екатеринбурга с диагнозом старческой астении. Все пациенты были однократно подвержены следующим исследованиям: общий осмотр, оценка выраженности болевых синдромов (боли в области сердца, грудной клетки, спины, абдоминальной боли, головной боли, боли в суставах) с использованием визуальной аналоговой шкалы боли (ВАШ), краткая батарея тестов физической активности, тест выраженности одышки mMRS, краткая шкала оценки психического статуса MMSE. Статистическую обработку данных осуществляли с помощью коэффициента корреляции Спирмена. Значения приняты достоверными при $p < 0,01$.

Результаты. Преастения диагностирована у 22,4 % пациентов, а выраженная астения у 77,6 %. Медиана возраста пациентов с преастенией составила 70 [69;84] лет, у пациентов с выраженной астенией – 77,84 [67; 91] лет. Выявлено, что интенсивность боли в сердце, по данным ВАШ, имеет тенденцию к положительной корреляции с краткой батареей тестов физической активности ($p = 0,0067$). Наличие и выраженность одышки по результатам mMRS достоверно коррелирует с краткой батареей тестов физической активности ($p = 0,043$).

Достоверная положительная корреляция выявлена между болью в области сердца и головной (коэффициент Спирмена – 0,33), абдоминальной болью (0,37), болью в спине (0,36) и суставах (0,39). Боль в спине достоверно коррелирует у пациентов с болью в грудной клетке (0,26), суставах (0,44), сердце (0,36). Боль в животе – с головной болью (0,43) и болью в области сердца (0,37). Показатели психического статуса пациентов (MMSE) имеют достоверную положительную связь с головной (0,33), абдоминальной болью (0,38), болью в области сердца (0,53), спины (0,32) и суставов (0,35). Наличие и выраженность одышки (mMRS) положительно коррелируют с наличием избыточной массы тела (0,29), головной (0,26) и суставной (0,39) болью.

Заключение. Принимая во внимание коморбидное состояние гериатрических пациентов, необходима полная развернутая оценка клинических характеристик для верной диагностики и назначения обоснованного лечения. Коррекция гериатрических симптомов необходима, так как развитие любого гериатрического симптома влечет за собой появление новых. Болевой синдром, влияющий на психическое состояние пациентов и их качество жизни, несомненно, требует симптоматического и этиопатогенетического лечения.

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

Васильева А. А.¹, Коновалов С. В.¹, Носова Е. А.¹,
Осинцев К. А.¹, Комиссарова И. А.²

¹*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
д. 34, ул. Московское шоссе, г. Самара, 443086, Российская Федерация,
e-mail: gol.nastya2018@yandex.ru*

²*Сибирский государственный индустриальный университет,
д. 42, ул. Кирова, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация,
e-mail: i.r.i.ss@yandex.ru*

Одной из задач современного машиностроения является обеспечение постоянного повышения эксплуатационных свойств деталей машин и механизмов, работающих в различных агрессивных средах. В большинстве случаев нет необходимости создавать деталь целиком из функционального материала, достаточно нанести на него покрытие с необходимыми свойствами. Нанесение многокомпонентных защитных покрытий технологией селективного лазерного сплавления – перспективный способ защиты деталей от воздействия рабочей среды. Для определения способности покрытия противостоять условиям циклического изменения температуры рабочей среды, а также для улучшения свойств материала проводят испытания на термоциклирование [1–3].

Цель работы – исследование структурного состояния, нанотвердости и термической стабильности никелевого покрытия из порошка ВВ751П, нанесенного технологией селективного лазерного сплавления на титановую подложку из сплава ВТ20.

Для реализации цели селективным лазерным сплавлением на установке SLM 280Н было получено покрытие из сплава из жаропрочного сплава ВВ751П на подложку из титанового сплава ВТ20 [4]. Термоциклирование проводилось по следующей схеме: нагрев в печи сопротивления без защитной атмосферы до температуры 800 °С, выдержка 20 мин, резкий перенос на спокойный воздух комнатной температуры (20 °С), выдержка 20 мин. Цикл повторяли 10 раз. Было установлено, что после завершения испытаний какие-либо отслоения и трещины отсутствуют. Отсутствие отслоений говорит о хорошей адгезионной прочности при циклических температурных нагрузках на покрытие.

Измерение нанотвердости по сечению образцов, выполненное на нанотвердомере DУН-211S, показало, что нанотвердость покрытия из порошка ВВ751П составляет 10,5 ГПа на расстоянии 50 мкм от поверхности и при удалении от поверхности уменьшается до 5,6 ГПа (нанотвердость основы). Следовательно, сформированное покрытие в 1,9 раз прочнее, чем материал основы – титан ВТ20.

Структуру и элементный состав слоя, сформированного при селективном лазерном сплавлении порошка сплава ВВ751П, анализировали методами сканирующей электронной микроскопии поперечных шлифов. Установлено, что граница, отделяющая наплавленный слой от объема образца, волнистая. Вследствие этого толщина спеченного слоя изменяется в пределах от 70 до 130 мкм. Установлено, что основной фазой исходного сплава ВТ20 является твердый раствор на основе б-титана. Поверхностный слой образца, сформированного при селективном лазерном сплавлении порошка сплава ВВ751П, является многофазным. Основными являются фазы, в той или иной мере содержащие атомы титана. Этот факт указывает на высокую концентрацию атомов титана в спеченном слое.

Таким образом, показано, что технологией селективного лазерного сплавления сформировано покрытие, обладающее повышенной нанотвердостью и хорошей адгезионной прочностью.

Литература

1. Трефилова Н. В. Анализ современных методов нанесения защитных покрытий // Современные наукоемкие технологии // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – Вып. 10. – С. 67–67.
2. Осколкова Т. Н., Глезер А. М. Современное состояние научной проблемы поверхностного упрочнения карбидовольфрамовых твердых сплавов (обзор) // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, вып. 12. – С. 980–991.
3. Термоциклирование. Структура и свойства / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, Ю. П. Хараев, А. Д. Грешилов, Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. – 2014. – Вып. 2. – С. 5–9.
4. Градиентный анализ покрытия, полученного селективным лазерным сплавлением порошка жаропрочного сплава на титановую подложку / А. А. Голубева, С. В. Коновалов, В. Г. Смелов, Е. А. Носова, К. А. Осинцев, Ю. В. Никитина // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16 (3). – С. 399–406.

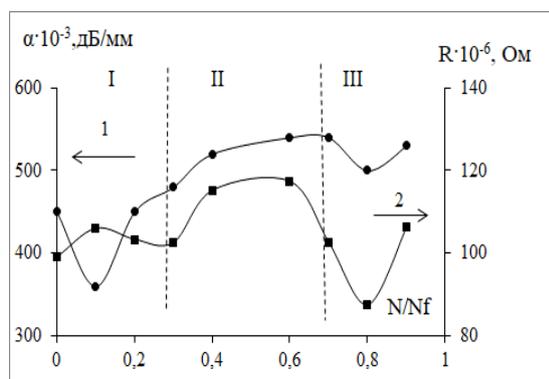
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЕРАРХИИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Левин В. П.

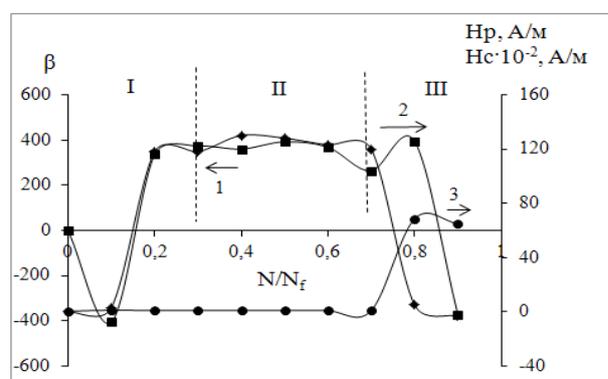
*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, 199334, Российская Федерация,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, 105005, Российская Федерация,
e-mail: vlevin@imet.ac.ru*

Процесс разрушения протекает как многостадийный процесс на различных структурных уровнях [1]. Возможность однозначной оценки остаточного ресурса конструкционных сталей во многом определяется иерархической природой развития поврежденности, возникающей на ранних стадиях деформирования. В работе было проведено исследование иерархии поврежденности сталей 20, 45 и 12X18H9T акустическим, магнитным и электрическими методами неразрушающего контроля после циклических нагрузок. На частоте 10 МГц в образцах были измерены скорость распространения V и коэффициент затухания продольных ультразвуковых волн α , напряженность собственного магнитного поля образца H_p , коэрцитивная сила H_c , вихретоковый параметр β и электросопротивление R . На рисунке представлены результаты измерения физических параметров в стали 12X18H9T после проведения циклического деформирования. Было обнаружено, что изменение всех физических параметров коррелирует между собой. По изменениям этих параметров можно выделить три основные стадии. Стадия I обычно связывается с упрочнением материала образца, а стадия III с формированием макротрещины. Природа стадии II была установлена после изучения микроструктуры поверхности образца.

С использованием реплик и прямого наблюдения полированной поверхности образцов под микроскопом в процессе остановок испытания наблюдали микротрещины в процессе нагружения [2]. Учет микротрещин различного размера позволил установить закономерности эволюции микротрещин в процессе циклического нагружения. Было установлено, что возникновению микротрещин каждого последующего среднего размера предшествует накопление дефектов предыдущего размера. Обнаружено, что при переходе от стадии I к стадии II происходит слияние трещин. При переходе от стадии II к стадии III число трещин меньших размера зерна сокращается, а число трещин превышающих размер зерна возрастает. Эти эволюционные изменения коррелируют с изменениями параметров неразрушающего контроля. Таким образом, по данным неразрушающего контроля можно исследовать иерархию микротрещин и сделать выводы о локализации поврежденности материала образца.



а



б

Графики изменений физических параметров: а – зависимость коэффициента затухания α продольных ультразвуковых волн (1) и электросопротивления R (2); б – зависимость вихретокового параметра β (1), напряженности собственного магнитного поля H_p (2) и коэрцитивной силы H_c (3) от относительной долговечности N/N_f

Аналогичные закономерности в иерархии микротрещин были обнаружены в статьях 20 и 45.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00674).

Литература.

1. Конева Н. А., Козлов Э. В. Физическая природа стадийности пластической деформации // Изв. вузов. Физика. – 1990. – № 2. – С. 89–106.
2. Ботвина Л. Р., Болотников А. И., Синев И. О. Иерархия микротрещин при циклическом и статическом нагружении // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22, № 6. – С. 24–36.

ЭВОЛЮЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ПОЛЕТНЫХ ЦИКЛАХ

Петухов Д. С., Келлер И. Э.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
1, ул. Акад. Королева, 614013, Пермь, Российская Федерация,
e-mail: petuhovds@mail.ru*

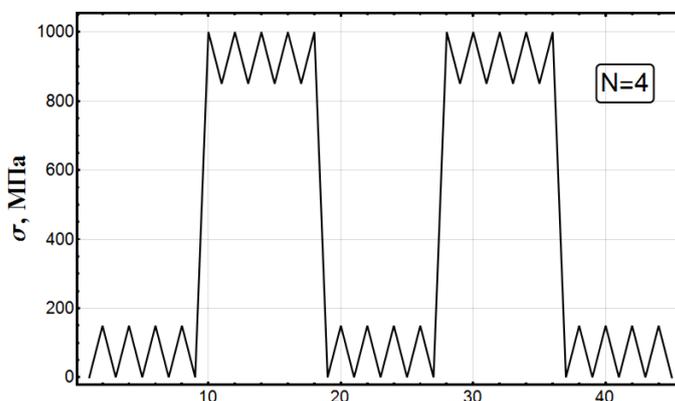
Эволюционная континуальная модель усталостного разрушения «Ottosen 2008» была модифицирована для большей гибкости при описании усталостного ресурса деталей на произвольных программах многоосного нагружения. Уравнения модели не связаны с уравнениями расчета напряжений детали, поэтому оценка усталостного ресурса производится в рамках постпроцессинга. Появление и развитие пластических деформаций не учитывается.

Модель основана на концепции поверхности выносливости, находящейся в пространстве напряжений. Пока напряженное состояние находится внутри поверхности, роста поврежденности не происходит, а когда оно выходит за пределы поверхности выносливости, поврежденность начинает расти. Уравнения модели имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \beta &= \sigma_e^{-1} \left(\sqrt{\frac{3}{2} (s - \alpha) : (s - \alpha)} + g(I_1(\sigma)) - \sigma_e \right), \\ \dot{\alpha} &= \frac{\|\dot{s}\|}{\sigma_e} h(\beta) f_1(\angle(\dot{s}, s - \alpha)) H(\beta) \frac{s - \alpha}{\|s - \alpha\|}, \quad s = \sigma - \frac{1}{3} I_1(\sigma) \mathbf{I}, \\ \dot{D} &= \frac{\|\dot{s}\|}{\sigma_e} p(\beta) f_2(\angle(\dot{s}, s - \alpha)) H(\beta), \quad H(\beta) = \begin{cases} 0, & \beta < 0 \\ 1, & \beta \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

здесь $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x} : \mathbf{x}}$, σ ; – тензор напряжений; D – скалярный параметр поврежденности; α – переменная, задающая положение поверхности выносливости в пространстве напряжений; β – параметр «перенапряжения» ($\beta = 0$ задает поверхность выносливости, $\beta < 0$ внутри поверхности и $\beta > 0$ вне); σ_e – константа модели; g, h, p, f_1, f_2 – материальные функции.

По сравнению с распространенными на практике различными вариациями метода подсчета циклов модель не принимает гипотезу линейного суммирования повреждений и поэтому способна описывать дополнительное накопление поврежденности при переходных процессах при блочных типах нагружения, а также накопление поврежденности на малоамплитудных осцилляциях, присутствующих в полетных циклах. На некоторых полетных циклах, наблюдается эффект антиприспособляемости, т. е., при повторении одной и той же программы нагружения, прирост поврежденности увеличивается а не уменьшается.



Блочное нагружение

В случае одноосного нагружения для идентификации модели нужны кривые Велера (одна или большее количество при различных коэффициентах асимметрии цикла), диаграмма Хейга и результаты эксперимента на блочном нагружении представлена на рисунке. Для идентификации модели по вышперечисленным экспериментальным данным был реализован поисковый итерационный алгоритм. Модель была идентифицирована для стали ВКС 170 и чугуна EN-GJV-450. Для детали из стали ВКС 170 проведена оценка усталостной прочности на полетных циклах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-08-01085 А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ Fe-30Cr-(8-16)Co ПОРОШКОВЫХ МАГНИТОТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Устюхин А. С., Зеленский В. А., Миляев И. М., Анкудинов А. Б.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
49, Ленинский пр., Москва, 119334, Российская Федерация,
e-mail: fcbneo@yandex.ru*

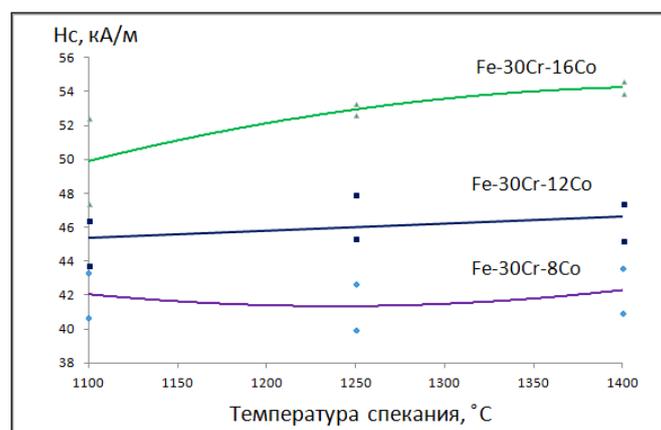
В результате исследований было показано, что для порошковых Fe-Cr-Co сплавов с низким и средним содержанием кобальта (8–16 мас. %) возможно использование более низких температур спекания (до 1150 °С), так как при этих условиях формируются плотные заготовки с отсутствием немагнитной γ -фазы после закалки. Цель работы – исследование магнитных свойств порошковых сплавов Fe-30Cr-8Co, Fe-30Cr-12Co и Fe-30Cr-16Co в температурном интервале спекания 1100 – 1400 °С и установление возможности получения необходимого уровня магнитных свойств у этих сплавов при низкотемпературных режимах спекания.

Относительная плотность спеченных образцов вышеуказанных сплавов после спекания при 1100 °С составила около 93–94 %. Результаты измерения магнитных свойств образцов, спеченных при 1100 °С, после полного цикла термообработки представлены в таблице.

Магнитные свойства Fe-30Cr-(8-16)Co сплавов, полученных
при температуре спекания 1100 °С

Сплав	Температура спекания, °С	Фазовый состав после закалки	B_r , Тл	H_c , кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м ³
Fe-30Cr-8Co	1100	α	1,18–1,19	40,7–43,4	27,6–30,2
Fe-30Cr-12Co		$\alpha + \gamma$ (следы)	1,16–1,19	43,7–46,4	29,4–32,0
Fe-30Cr-16Co		$\alpha + \gamma$ (следы)	1,12–1,17	47,4–52,4	28,4–31,8

Из анализа этих результатов следует, что магнитные свойства порошковых сплавов Fe-30Cr-8Co, Fe-30Cr-12Co и Fe-30Cr-16Co при температуре спекания 1100 °С обладают хорошим уровнем, а иногда и превышают характеристики литых аналогов. С повышением содержания кобальта коэрцитивная сила H_c сплавов увеличивается, но при этом несколько снижаются значения остаточной индукции B_r . Подобная зависимость сохраняется во всем исследованном интервале температур спекания. На рисунке представлены результаты измерения H_c трех сплавов в интервале температур спекания 1100–1400 °С.



Зависимость H_c порошковых сплавов Fe-30Cr-8Co, Fe-30Cr-12Co и Fe-30Cr-16Co
от температуры спекания

Коэрцитивная сила сплавов Fe-30Cr-8Co и Fe-30Cr-12Co практически не изменяется в зависимости от температуры спекания, в то время как у сплава Fe-30Cr-16Co наблюдается рост значений H_c с повышением температуры спекания. Остаточная индукция B_r всех трех сплавов увеличивается с повышением температуры спекания до 1400 °С: $B_r = 1,25-1,28$ Тл – для сплава Fe-30Cr-8Co; $B_r = 1,24-1,26$ Тл – для сплава Fe-30Cr-12Co и $B_r = 1,19-1,21$ Тл – для сплава Fe-30Cr-16Co. Максимальное энергетическое произведение $BH_{(max)}$ трех сплавов имеет практически идентичные показатели во всем интервале температур спекания и достигает наибольших значений 35–37 кДж/м³ при температуре спекания 1400 °С. Можно сделать вывод, что для порошковых сплавов системы Fe-Cr-Co важным фактором с точки зрения магнитных свойств является проведение спекания в области формирования однофазного α -твердого раствора.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-03-00666-а.

РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ТОРМОЗНЫХ ДИСКОВ ПО УСЛОВИЯМ ПРОЧНОСТИ

Блохин В. В.¹, Мозалев В. В.¹, Зинин А. В.², Лисин А. Н.¹

¹Авиационная корпорация «Рубин»,
5, шоссе Энтузиастов, квартал Западная Промзона,
г. Балашиха, Московская область, 143912, Российская Федерация,
e-mail: vbloch20@mail.ru

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
4, Волоколамское шоссе, Москва, 125993, Российская Федерация,
e-mail: allzin@yandex.ru

Тренд на увеличение продолжительности и интенсификацию эксплуатации авиационной техники устанавливают жесткие требования по обеспечению повышенных ресурсных характеристик наиболее ответственных узлов и агрегатов самолета, в частности системы торможения.

Основным конструктивным элементом современного тормоза авиационных колес является набор из последовательно чередующихся пар вращающихся и неподвижных углерод-углеродных (УУКМ) тормозных дисков. Подвижные диски имеют симметрично расположенные облицованные металлом пазы, в которые при монтаже входят шлицы колеса, обеспечивая совместное вращение дисков и колеса. Закрепленные на валу шасси неподвижные диски меньшего диаметра в свободном состоянии не препятствуют вращению колеса и подвижных дисков. При торможении гидропривод тормозной системы обеспечивает фрикционный контакт вращающихся и неподвижных дисков, и тормозной момент от сил трения через шлицы передается на колесо. Анализ механики взаимодействия отдельных элементов тормозной системы колеса устанавливает в качестве наиболее нагруженной и ресурсоограничивающей зоны тормозного диска область контакта шлица и поверхности шипа [1].

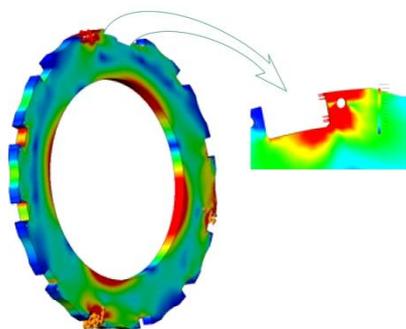


Рис. 1. Конечно-элементная модель диска

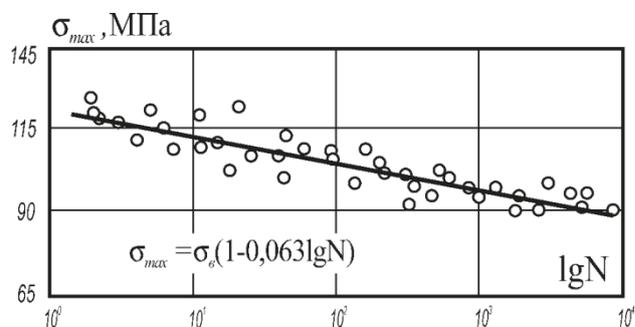


Рис. 2. Кривая малоциклового усталости УУКМ при сжатии

В полной мере оценить распределение напряжений для выявления ресурсограничивающих зон конструкции, позволяет конечно-элементный анализ диска из УУКМ (рис. 1).

Предварительный расчет долговечности диска по условиям усталостной прочности проводился по результатам усталостных испытаний на сжатие образцов УУКМ, вырезанных из диска в окружном направлении (рис. 2). Уравнение экспериментальной кривой малоциклового усталости принято в виде, соответствующем модели прогрессирующего разрушения [2]:

$$\sigma_{\max}(N) = \sigma_0(1 - a \lg N)$$

При расчетах ресурсных показателей тормозного диска основные конструктивно-технологические параметры объекта – масштабный фактор и концентрация напряжений в области паза – учитываются в соответствии с градиентной теорией [3] предельного состояния хрупкого анизотропного материала.

Литература

1. Степашкин Л. Л., Мозалев В. В., Мостовой Г. Е. Оценка ресурса углерод-углеродных тормозных дисков авиаколес с учетом эволюции механических свойств материала // Автомобиле- и тракторостроение в России: Приоритеты развития и подготовка кадров : материалы 77-й междунар. науч.-техн. конф. ААИ. – М. : Изд-во МГТУ «МАМИ», 2012. – Кн. 5. – С. 93–115.
2. Azikov N. S., Zinin A. V. A destruction model for an anisogrid composite structure // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – Т. 47 (№ 5). – С. 427–433.
3. Полилов А. Н. Этюды по механике композитов. – Москва : ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2015. – 316 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕЖРАЗЛОМНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ФРОНТОВ

Казакбаева А. А.¹, Смолин И. Ю.^{1,2}

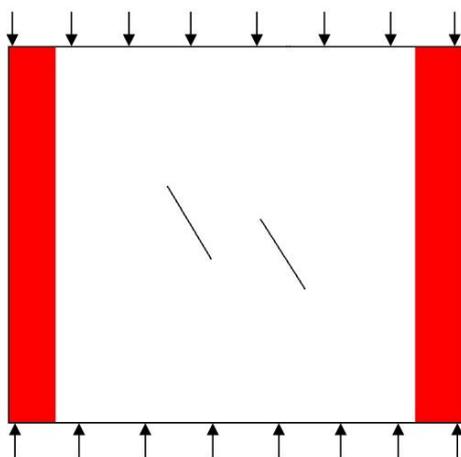
¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: aigerim_@bk.ru

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

Наблюдения за миграцией землетрясений вдоль активных разломов и последующие теоретические исследования положили начало разработке проблемы медленных деформационных волн в литосфере. Для описания этого явления предлагались разные термины: тектонические волны, волны сейсмоактивности, D-волны, криповые волны напряжений, фронт деформаций волновой природы, волны активизации разломов, деформационные волны, деформационные автоволны, волны быстрых предвестников, солитоны и др. [1].

Исследование пространственно-временной миграции современных геодинамических процессов является, с одной стороны, одной из наиболее интересных задач геодинамики, с другой – одной из наиболее дискуссионных проблем.

Решение этой важной проблемы связано с разработкой фундаментальной теории эволюции напряженно-деформированного состояния в нагружаемой прочной среде, охватывающей спектр ключевых процессов деформации и разрушения, включая процессы генерации медленных деформационных возмущений, способных эффективно переносить и перераспределять в нагружаемой среде энергию [2].



Пример структурной карты модельной среды с разломами и условиями нагружения

Для изучения вопросов генерации и распространения межразломных медленных деформационных волн были использованы структурные карты модельной среды с разломами. Эти карты содержат два разлома (узкие полосы, в которых прочность меньше, чем в окружающей среде), а также две приграничные области, моделирующие упругое воздействие окружающей среды. В разных картах варьировалось взаимное расположение разломов. Пример одной из структурных карт представлен на рисунке. Выполнены тестовые расчеты с целью верификации модели по известным оценкам скоростей распространения медленных межразломных деформационных волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ 19-17-00122.

Литература

1. Борняков С. А, Пантелеев И. А, Тарасова А. А. Дискретно-волновая динамика деформаций в сдвиговой зоне: результаты физического моделирования // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7 (2). – С. 289–302.
2. Макаров П. В., Хон Ю. А., Перышкин А. Ю. Медленные деформационные фронты. Модель и особенности распространения // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9 (3). – С. 755–769.

ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Трофимов В. Н.¹, Карманов В. В.¹, Ширяев А. А.¹,
Владыкин А. В.², Виндокуров Д. С.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: tvn_perm@mail.ru; alex_sh_23-1@mail.ru

²АО «ОДК-ПМ»,
93, Комсомольский проспект, Пермь, 614010, Российская Федерация

Одной из причин разрушения ответственных деталей аэрокосмической техники, атомного и энергомашиностроения и др. являются поверхностные дефекты, возникающие в процессе их изготовления и эксплуатации.

Для повышения физико-механических свойств поверхности деталей в промышленности широкое применение получили методы поверхностного пластического деформирования (ППД), в частности методы дробеструйной обработки.

Физическая суть методов дробеструйной обработки заключается в формировании на поверхности деталей тонкого пластически деформированного слоя, физико-механические свойства которого отличаются от свойств основного металла [1–3].

Актуальной характеристикой поверхностного слоя после ППД являются толщина упрочненного слоя.

При проектировании технологического процесса дробеструйной обработки эффективность обработки удобно определять тестом, основанном на измерении прогиба стандартной измерительной пластины – пластины Альмена. Пластину Альмена, подвергнутую дробеструйной обработке, можно представить в виде биметаллической пластины, деформация которой определяется объемными изменениями пластически деформированного поверхностного слоя.

В работе рассмотрены известные решения, позволяющие определить напряжения в поверхностных слоях биметаллической пластины [1, 4–6].

Проведены экспериментальные исследования по ультразвуковой дробеструйной обработке (УЗДО) пластин Альмена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Решена обратная задача определения толщины упрочненного слоя на основе результатов теста и результатов определения поверхностных остаточных напряжений с использованием рентгеновского метода. Полученные результаты использованы для разработки методики определения толщины упрочненного слоя.

Литература

1. Саверин М. М. Дробеструйная обработка. Теоретические основы и практика применения. – М. : Машгиз, 1955. – 312 с.
2. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
3. Кудрявцев И. В. Повышение прочности и долговечности крупных тяжелых деталей машин поверхностным наклепом. – М. : НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. – 144 с.
4. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. – М.–Л. : ОГИЗ-Гостехиздат, 1946. – 532 с.
5. Сироткина Н. М., Сироткина Н. С. Расчет внутренних напряжений в покрытиях на основе теории изгиба двухслойной балки // Механика. Математика. – 2002. – Вып. 4. – С. 222–225
6. Stoney G. The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis // Proc. R. Soc. Ser. A. – Vol. 32. – London, 1909. – P. 172.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ГАЗОПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Санников И. И.¹, Голиков Н. И.¹, Терентьев Н. Н.²,
Ксенофонтов П. В.³, Жирков А. Р.³

¹ИФТПС СО РАН,

д. 1, ул. Октябрьская, Якутск, 677000, Российская Федерация,
e-mail: i.i.sannikov@mail.ru; n.i.golikov@mail.ru

²ООО «Газэкспертсервис»,

д. 1, Зодчих переулок, Якутск, 677021, Российская Федерация,
e-mail: gasexperts_yak@mail.ru

³АО «Сахатранснефтегаз», блок «В»,

д. 18, ул. Кирова, Якутск, 677027, Российская Федерация

Одной из важнейших научно-технических проблем современности остается проблема продления ресурса безопасной эксплуатации потенциально опасных высокорисковых объектов. К числу таких систем относятся магистральные газопроводы из-за повышенного риска возникновения в них техногенных аварий, вызванных недостаточной эксплуатационной надежностью металла и сварных соединений. Магистральные газопроводы Республики Саха (Якутия) являются уникальными металлоемкими конструкциями, которые проложены и эксплуатируются в зоне распространения вечномёрзлых грунтов с 1970 г. Анализ возникновения аварийных ситуаций на магистральном газопроводе Республики Саха (Якутия) свидетельствует о том, что возрастает опасность отказов, обусловленных деградационными процессами в металле труб при их длительной эксплуатации [1–3].

Исследование поведения трубных сталей в процессе длительной эксплуатации имеет большое значение для понимания процессов разрушения. Прикладная задача таких исследований состоит в оценке технического состояния материала труб и выработке прогнозов, касающихся перспектив дальнейшей безопасной эксплуатации действующих газопроводов. Известно, что предел прочности и твердость трубных сталей в процессе эксплуатации изменяются незначительно, значения предела текучести несколько увеличиваются, а уровень относительного удлинения снижается. Таким образом, механические свойства материала за довольно длительный период эксплуатации труб в составе магистральных газопроводов не нарушают соответствия фактических характеристик, требуемых по нормативу. Однако с увеличением срока эксплуатации возможно проявление тенденции к повышению температуры вязко-хрупкого перехода, развиваются усталостные процессы, приводящие к снижению критического размера допустимых дефектов, возрастает опасность коррозионного растрескивания под напряжением.

В статье представлены результаты исследования физико-механических свойств основного металла и сварных соединений участков магистрального газопровода. Образцы для исследования были вырезаны из фрагментов труб Ш219 и Ш529 мм из разных участков магистрального газопровода «Таас–Тумус–Якутск» и газопровода-отвода с. Намцы. Магистральный газопровод «Таас–Тумус–Якутск» эксплуатируется более 50 лет, а газопровод-отвод с. Намцы – более 35 лет.

Полученные результаты механических испытаний образцов сравнивались с данными сертификатов труб согласно исполнительно-технической документации газопровода по соответствующим маркам сталей, выявленных спектральным анализом.

Литература

1. Чухарева Н. В., Тихонова Т. В., Миронов С. А. Анализ причин аварийных ситуаций при эксплуатации магистральных трубопроводов в условиях Крайнего Севера в период с 2000 по 2010 год // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 231–243. – URL: http://www.ogbus.ru/authors/Chuhareva/Chuhareva_1.pdf

2. Большаков А. М. Анализ разрушений и дефектов в магистральных газопроводах и резервуарах Севера // Газовая промышленность. – 2010. – № 5. – С. 52–53.
3. Разрушения и повреждения при длительной эксплуатации объектов нефтяной и газовой промышленности / А. М. Большаков, Н. И. Голиков, А. С. Сыромятникова, А. А. Алексеев, Р. П. Тихонов // Газовая промышленность. – 2007. – № 7. – С. 89–91.

АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ АНИЗОТРОПНЫХ МЕТАЛЛОВ

Третьяков Д. А.¹, Беляев А. К.², Полянский В. А.²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
д. 29, ул. Политехническая, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация,
e-mail: dmitry.tretyakov93@yandex.ru

²Институт проблем машиноведения РАН,
61, пр. В.О. Большой, г. Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация,
e-mail: vice.ipme@gmail.com; vapol@mail.ru

Использование безразмерного параметра акустической анизотропии для контроля напряженного состояния и оценки поврежденности промышленных конструкций представляет большой интерес. Традиционно акустическая анизотропия используется в методе акустоупругости, который наряду с методами натурной тензометрии является сертифицированным методом оценки величины механических напряжений в области упругих деформаций. Для расчета значений акустической анизотропии измеряется фазовый сдвиг между поперечными волнами ортогональной поляризации. Причиной его возникновения может являться сколь угодно малое изменение упругих свойств материала, а также накопление пластических деформаций и дефектов в процессе эксплуатации конструкций. Практическая реализация метода является достижением преимущественно отечественных советских и российских исследователей. В дело сертификации метода акустоупругости в атомной энергетике и нефтегазовой отрасли большой вклад был внесен Н.Е. Никитиной (1951–2016) из Нижегородского Института проблем машиностроения РАН.

До настоящего времени исследования в неупругой области ограничивались случаем начально изотропных материалов и зоной малых пластических деформаций, для которых была установлена линейная связь с величиной акустической анизотропии.

Работа посвящена экспериментальному исследованию процесса пластического деформирования металлов с ненулевой начальной анизотропией механических свойств с помощью акустической анизотропии. Исследовались образцы, изготовленные из алюминиевого проката, начальное текстурирование которых имело неравномерный характер по длине образцов и вносило дополнительный вклад в величину акустической анизотропии.

Работа состоит из двух частей. В первой части проанализирован характер изменения акустической анизотропии в широком диапазоне напряжений вплоть до значений, соответствующих пределу временного сопротивления на осредненной кривой деформирования. Получена зависимость акустической анизотропии от неупругих деформаций для образцов, вырезанных как вдоль, так и поперек направления проката, включающая участки, подчиняющиеся соотношениям линейной теории акустоупругости и теории акустопластичности в зоне малых пластических деформаций. Предложен подход к описанию практически не исследованной ранее зоны больших пластических деформаций с учетом начального текстурирования и изменения распределений акустической анизотропии вдоль рабочей части образцов в процессе локализации пластических деформаций.

Во второй части работы исследованы направления поляризации поперечных ультразвуковых волн, отличные от коллинеарных направлению действия растягивающей нагрузки. Установлен факт существенного влияния текстурирования на величину и характер распределения акустической анизотропии вдоль восьми различных направлений поляризации волн. Для анализа анизотропного характера изменения свойств в процессе одноосного растяжения, предложен метод, основанный на построении угловых диаграмм акустической анизотропии.

Полученные результаты указывают на возможность оценки напряженного состояния металла на различных стадиях неупругого деформирования по результатам измерений акустической анизотропии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, гранты 20-08-01100, 18-08-00201 и 18-31-00329.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ АВИАЦИОННЫХ КОЛЕС В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

Зубань В. Н.¹, Зинин А. В.²

¹Авиационная корпорация «Рубин»,
5, шоссе Энтузиастов, квартал Западная Промзона,
г. Балашиха, Московская область, 143912, Российская Федерация,
e-mail: zuban467@mail.ru

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
4, Волоколамское шоссе, Москва, 125993, Российская Федерация,
e-mail: allzin@yandex.ru

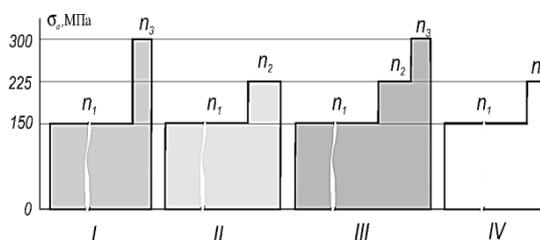
Обоснование характеристик ресурса авиационных колес на стадии проектирования необходимо проводить с учетом особенностей эксплуатационного спектра нагружения [1]. Следует выделить два различных процесса перемещения по аэродрому – прямолинейное движение самолета при разбеге и пробеге в отсутствие боковой силы и руление по траекториям с поворотами, вызывающими действие боковой нагрузки P_z .

Количественные оценки нагрузок на различных этапах движения самолета отличаются в зависимости от величины и направления боковой нагрузки. Степень влияния боковой нагрузки при типовых маневрах установлена по результатам летных испытаний и учитывается коэффициентом нагруженности $K_{P_z} : K_{P_z} = 1 + P_z/P_y$. При движении самолета по прямой $K_{P_z} = 1$. Тогда расчетная оценка ресурса T [2] колеса может быть получена по формуле:

$$T = \frac{2\pi R_{cp}}{L_{нол}} \frac{c\sigma_{np}^{-m}}{\sum_{i=1}^r t_i K_{P_z i}^m} D_p,$$

где R_{cp} – радиус колеса; $L_{нол}$ – длина траекторий наземного движения; σ_{np} – напряжения эквивалентного цикла при движении по прямой; t_i – относительная длительность i -го этапа движения; c, m – параметры кривой усталости; D_p – предельное усталостное повреждение.

Для определения значения D_p , соответствующего скорректированной теории накопления повреждений [3], проведены программные испытания на усталость образцов сплава АК6, вырезанных из натуральных колес. По результатам программных испытаний, в ходе которых реализованы 4 варианта спектра нагружения (рисунок), рассчитывали величину повреждения, накопленного перед разрушением.



Спектры программного нагружения

Дисперсионный анализ по критериям Краскела–Уоллиса и Бартлетта показал, что варианты программ нагружения не оказывают значимого влияния на величину D_p . Для алюминиевого сплава АК6 среднее значение предельного повреждения составляет 0,513, среднеквадратическое отклонение 0,096.

Таким образом, экспериментально обоснована применимость скорректированной теории накопления усталостных повреждений для прогнозирования ресурса авиационных колес из алюминиевых сплавов.

Литература

1. Комплексный метод повышения долговечности авиационных колес и установления ресурсных показателей / В. Н. Зубань, А. Н. Лисин, В. В. Мозалев, А. В. Зинин, Н. С. Азиков // Приводы и компоненты машин. – 2019. – № 3–4 (32). – С. 24–30.
2. Степнов М. Н., Зубань В. Н., Зинин А. В. Оценка долговечности авиационных конструкций на основе модифицированного уравнения подобия усталостного разрушения // XII международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» : сборник материалов. – 2018. – С. 135–136.
3. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М. : Машиностроение, 1977. – 232 с.

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА СУСТАВНОГО КОНЦА КОСТИ ПРИ ОРГАНОСБЕРЕГАЮЩЕМ ОПЕРАТИВНОМ ЛЕЧЕНИИ РЕВМАТОИДНЫХ АРТРИТОВ ПЯСТНОФАЛАНГОВЫХ СУСТАВОВ ПАЛЬЦЕВ КИСТИ

Обухов И. А.

*ГБУЗ СО ЦСВМП «УИТО им. В.Д. Чаклина»,
7, Банковский пер., Екатеринбург, 620000, Российская Федерация,
e-mail: obukhov@e1.ru*

Цель работы – ресурса суставных концов пястнофаланговых (ПФС) суставов пациентов с ревматоидным артритом (РА) кисти после субтотальной синовэктомии с фиксацией специальным аппаратом (ФСА).

Материал и методы исследования. Проведено проспективное исследование результатов оперативного лечения 12 пациенток с РА пальцев кисти, лечившихся в период с 2010 по 2018 гг. Женщины были в возрасте от 26 до 67 лет. Давность ревматоидного процесса 8 и более лет (в среднем – 10,3 лет). Всего было 19 пораженных кистей – 68 ПФС пальцев с ультранарными девиациями ПФС типа «ласта моржа», с ладонными подвывихами и вывихами фаланг. Использовались клинический и лучевые методы диагностики (стандартная рентгенография и компьютерная томография суставов пальцев кисти) в сроки до операции, после операции, через 6, 12 и более мес. Оценивались ось поврежденного луча (фаланг и пястной кости), сохранность суставных поверхностей, их конгруэнтность, плотность суставного конца (субхондральной части кости).

Пациентам выполнялась субтотальная синовэктомия, вправление фаланг, чрезсуставная фиксация спицами и ФСА. Суставные поверхности не резецировались, удалялись только костные разрастания по их краям. ФСА проводилась в течение 5–6 недель.

Результаты. Ближайшие (3,6 месяцев после операции) и отдаленные результаты (через 12 мес. и более после операции) изучены у всех больных. Через 3 мес. после операции ось пораженного луча оставалась правильной, отмечался выраженный остеопороз суставных концов, размытость контуров смежных отделов костей. Щели суставов сужены. Через 6 месяцев отмечалось сохранение правильного положения прооперированных суставов, восстановление движений в ПФС в среднем до 90 % соответственно от нормы. На рентгенограммах ось пораженного луча пальца оставалась правильной, величина субхондральной деформации (при наличии ее до операции) оставалась прежней, сохранялись явления остеопороза эпиметафизарных отделов костей. Зоны дооперационного дефекта костей не увеличивались.

Субъективная оценка восстановления функции пальцев кисти самими пациентами (по системе DASH и ВАШ) во всех случаях оказалась положительной, что позволило проводить операцию на второй кисти у 6 пациентов уже через 8–10 мес. после первой операции. В сроки 1 год и более после операции правильное положение фаланг пальцев в ПФС отмечено в наблюдениях из 61 (89,7 %), полное восстановление амплитуды движений в ПФС – в 62 (91,0 %). Оси пораженных лучей оставались правильной формы, щели суставов прослеживались во всех случаях, не отмечено прогрессирующих явлений разрушения суставных поверхностей пораженных суставов. Из 9 пациенток, наблюдаемых в сроки более 3 лет, у 8 больных деформации пальцев не отмечено, у 1 пациентки выявлена деформация 2 прооперированных суставов.

Заключение. Органосберегающее оперативное лечение (синовэктомия в сочетании с фиксацией специальным аппаратом) позволяет в течение продолжительного периода сохранить суставные концы поврежденных суставов, воссоздать правильное взаимоположение костей в пястнофаланговых суставах и восстановить полноценные движения в ПФС, что способствует улучшению качества жизни пациентов

ДИСТРАКЦИОННЫЙ МЕТОД В ЛЕЧЕНИИ ЖЕНЩИН В ПОСТМЕНОПАУЗАЛЬНОМ ПЕРИОДЕ С ПОСЛЕДСТВИЯМИ ПЕРЕЛОМОВ ДИСТАЛЬНОГО ЭПИМЕТАФИЗА ЛУЧЕВОЙ КОСТИ

Панченко Е. Н.¹, Обухов И. А.^{1,2}

¹ФГКУЗ «5 военный клинический госпиталь ВНГ РФ», Российская Федерация,
e-mail: epn@mail.ru

²ГБУЗ СО ЦСВМП «УИТО им. В.Д. Чаклина»,
7, Банковский пер., Екатеринбург, 620000, Российская Федерация,
e-mail: obukhov@e1.ru

Цель работы – улучшение функциональных результатов лечения больных с последствиями переломов ДЭМЛК у женщин в постменопаузальном периоде

Материал и методы исследования. Проведено ретроспективное исследование 37 женщин в постменопаузальном периоде с неправильно сросшимися переломами ДЭМЛК, находившихся на лечении в травматологическом отделении 5 военного клинического госпиталя ВНГ РФ с 2013 по 2018 гг. и институт травматологии им. В.Д. Чаклина с 2017 по 2019 гг. Пациенты были в возрасте от 50 до 78 лет. В анамнезе – переломы ДЭМЛК по классификации АО: В2, В3, С1, С2. При обращении у всех пациентов был диагностирован неправильно сросшийся перелом дистального эпиметафиза лучевой кости в сочетании со стойкой контрактурой кистевого сустава.

Исследование предполагало клиническую оценку состояния верхней конечности по системе DASH, ВАШ, измерение движений в кистевом суставе. Рентгенометрическая оценка проводилась по 5 параметрам, включая лучелоктевой индекс, высоту шиловидного отростка, наклон суставной поверхности, наличие суставной ступеньки, ширины суставной поверхности. Всем пациентам проводилось оперативное лечение с использованием дистракционного метода. На первом этапе больным выполнялись остеотомия лучевой кости на вершине деформации и закрытый дистракционный остеосинтез аппаратом Илизарова. Деформация устранялась посредством постепенной дистракции в режиме 1 мм в сутки, начиная с 5–7 суток после операции. На втором этапе по достижению удовлетворительного положения отломков ДЭМЛК проводился перемонтаж аппарата для устранения контрактур кистевого сустава и суставов предплечья и постепенная дистракция мягких тканей на уровне кистевого сустава. Сроки фиксации в аппарате составляли 6–8 недель. После снятия АВФ проводилась пассивная и активная разработка движений.

Результаты. Ближайшие и отдаленные результаты изучены у всех 37 больных. У всех прооперированных пациентов клинически отмечалось исчезновение болей в кистевом суставе, восстановление движений в кистевом суставе и суставах предплечья. Отмечалась положительная динамика в виде уменьшения баллов по шкале оценки DASH в среднем с 52 до 13 баллов. Рентгенометрическая оценка состояния лучевой кости: во всех случаях отмечено восстановление анатомических параметров лучевой кости восстановление конгруэнтности суставной поверхности лучевой кости (исчезновение «ступеньки»). В 34 случаях из 37 достигнуто сращение лучевой кости в правильном положении и восстановление амплитуды движений в кистевом суставе и суставах предплечья спустя шесть месяцев после операции. В 30 случаях получен хороший результат, в 7 – удовлетворительный. Плохих результатов не выявлено.

В сроки 1 год и более в 7 случаях на рентгенограммах выявлены признаки посттравматического деформирующего остеоартроза кистевого сустава I–II ст.

Заключение. Корректирующая остеотомия в сочетании с дистракционным остеосинтезом является оптимальным методом лечения неправильно сросшихся переломов лучевой кости в сочетании с контрактурами кистевого сустава у женщин в постменопаузальном периоде.

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТЕРЖНЯ С ДВУМЯ ПРИСОЕДИНЕННЫМИ ГРУЗАМИ

Коростелева Д. М.¹, Самсонов А. А.², Соловьев П. С.², Соловьев С. И.²

¹Казанский государственный энергетический университет,
д. 51, ул. Красносельская, Казань, 420066, Российская Федерация,
e-mail: diana.korosteleva.kpfu@mail.ru

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,
д. 18, ул. Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,
e-mail: anton.samsonov.kpfu@mail.ru; pavel.solovyev.kpfu@mail.ru; sergei.solovyev@kpfu.ru

Исследуются собственные колебания неоднородного стержня переменного сечения, жестко закрепленного в граничных точках, с двумя присоединенными грузами во внутренних точках. Собственные колебания механической системы моделируются дифференциальной задачей на собственные значения второго порядка с переменными коэффициентами, граничными условиями жесткого закрепления и дополнительными условиями сопряжения в точках присоединения грузов, содержащими спектральный параметр. Существует последовательность положительных простых собственных значений с предельной точкой на бесконечности и соответствующая полная ортонормированная система собственных функций. В работе сформулированы предельные спектральные задачи и установлена сходимость решений исходной задачи к решениям предельных спектральных задач при бесконечном увеличении масс присоединенных грузов. Исходная задача аппроксимируется сеточной схемой метода конечных элементов. Исследуется погрешность приближенных решений. Прикладные задачи на собственные значения исследовались в работах [1–9], приближенные методы изучены в [10–23]. Теоретические результаты работы могут быть обобщены для задач о собственных колебаниях балок, пластин и оболочек с присоединенными грузами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-41-160029. Работа поддержана РФФИ (проект № 20-08-01154).

Литература

1. Вычисление минимального собственного значения нелинейной задачи Штурма–Лиувилля / В. С. Желтухин, С. И. Соловьев, П. С. Соловьев, В. Ю. Чебакова // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155 (3). – С. 91–104.
2. Third type boundary conditions for steady state ambipolar diffusion equation / V. S. Zheltukhin, S. I. Solov'ev, P. S. Solov'ev, V. Yu. Chebakova, A. M. Sidorov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. – Vol. 158. – P. 012102.
3. Existence of solutions for electron balance problem in the stationary radio-frequency induction discharges / V. S. Zheltukhin, S. I. Solov'ev, P. S. Solov'ev, V. Yu. Chebakova // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. – Vol. 158. – P. 012103.
4. Solov'ev S. I. Eigenvibrations of a Beam with Elastically Attached Load // Lobachevskii J. Math. – 2016. – Vol. 37 (5). – P. 597–609.
5. Solov'ev S. I. Eigenvibrations of a Bar with Elastically Attached Load // Differ. Equations. – 2017. – Vol. 53 (3). – P. 409–423.
6. Dautov R. Z., Lyashko A. D., Solov'ev S. I. The bisection method for symmetric eigenvalue problems with a parameter entering nonlinearly // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. – 1994. – Vol. 9 (5). – P. 417–427.
7. Lyashko A. D., Solov'ev S. I. Fourier method of solution of fe systems with hermite elements for Poisson equation // Sov. J. Numer. Anal. Math. Model. – 1991. – Vol. 6 (2). – P. 121–129.
8. Solov'ev S. I. Superconvergence of finite element approximations to eigenspaces // Differ. Equations. – 2002. – Vol. 38 (5). – P. 752–753.

9. Solov'ev S. I. The error of the Bubnov-Galerkin method with perturbations for symmetric spectral problems with a non-linearly occurring parameter // *Comput. Math. Math. Phys.* – 1992. – Vol. 32 (5). – P. 579–593.
10. Solov'ev S. I. Superconvergence of finite element approximations of eigenfunctions // *Differ. Equations.* – 1994. – Vol. 30 (7). – P. 1138–1146.
11. Solov'ev S. I. Finite element approximation with numerical integration for differential eigenvalue problems // *Appl. Numer. Math.* – 2015. – Vol. 93. – P. 206–214. – URL: http://ezproxy.urfu.ru:2077/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=10&SID=C2oAMHn2qizu9ktMz1c&page=1&doc=14&cacheurlFromRightClick=no
12. Solov'ev S. I. Fast direct methods of solving finite-element grid schemes with bicubic elements for the Poisson equation // *J. Math. Sci.* – 1994. – Vol. 71. – P. 2799–2804.
13. Solov'ev S. I. A fast direct method of solving hermitian fourth-order finite-element schemes for the Poisson equation // *J. Math. Sci.* – 1995. – Vol. 74. – P. 1371–1376.
14. Zhigalko Y. P., Solov'ev S. I. Natural oscillations of a beam with a harmonic oscillator // *Russ. Math. Sci.* – 2001. – Vol. 45 (10). – P. 33–35.
15. Соловьев С. И. Метод конечных элементов для несамосопряженных спектральных задач // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки.* – 2006. – Т. 148 (4). – С. 51–62.
16. Соловьев С. И. Аппроксимация симметричных спектральных задач с нелинейным вхождением параметра // *Известия высших учебных заведений. Математика.* – 1993. – № 10. – С. 60–68.
17. Samsonov A. A., Solov'ev S. I. Eigenvibrations of a beam with load // *Lobachevskii J. Math.* – 2017. – Vol. 38 (5). – P. 849–855.
18. Dautov R. Z., Lyashko A. D., Solov'ev S. I. Convergence of the Bubnov-Galerkin method with perturbations for symmetric spectral problems with parameters entering nonlinearly // *Differ. Equations.* – 1991. – Vol. 27 (7). – P. 799–806.
19. Solov'ev S. I., Solov'ev P. S. Finite Element Approximation of the Minimal Eigenvalue of a Nonlinear Eigenvalue Problem // *Lobachevskii J. Math.* – 2018. – Vol. 39 (7). – P. 949–956.
20. Solov'ev S. I., Solov'ev P. S., Chebakova V. Y. Finite difference approximation of electron balance problem in the stationary high-frequency induction discharges // *MATEC Web of Conferences.* – 2017. – Vol. 129. – P. 06014.
21. Samsonov A. A., Solov'ev S. I., Solov'ev P. S. Eigenvibrations of a bar with load // *MATEC Web of Conferences.* – 2017. – Vol. 129. – P. 06013.
22. Samsonov A. A., Solov'ev S. I., Solov'ev P. S. Eigenvibrations of a simply supported beam with elastically attached load // *MATEC Web of Conferences.* – 2018. – Vol. 224. – P. 04012.
23. Samsonov A. A., Solov'ev S. I. Investigation of eigenvibrations of a loaded bar // *MATEC Web of Conferences.* – 2018. – Vol. 224. – P. 04013.

КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛЬНОЙ БАЛКИ С УПРУГО ПРИСОЕДИНЕННЫМ ГРУЗОМ

Самсонов А. А.¹, Коростелева Д. М.², Соловьев П. С.¹, Соловьев С. И.¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
д. 18, ул. Кремлевская, Казань, 420008, Российская Федерация,
e-mail: anton.samsonov.kpfu@mail.ru; pavel.solovyev.kpfu@mail.ru; sergei.solovyev@kpfu.ru

²Казанский государственный энергетический университет,
д. 51, ул. Красносельская, Казань, 420066, Российская Федерация,
e-mail: diana.korosteleva.kpfu@mail.ru

Исследуется задача о собственных колебаниях неоднородной консольной балки переменного сечения с упруго присоединенным грузом к свободному торцу. Задача описывается дифференциальным уравнением на собственные значения четвертого порядка с переменными коэффициентами, граничным условием защемления и дополнительными условиями в точке упругого крепления груза, содержащими нелинейно спектральный параметр. В работе установлено существование последовательности положительных простых собственных значений с предельной точкой на бесконечности. Этим собственным значениям соответствует нормированная система собственных функций. Исходная нелинейная дифференциальная задача на собственные значения аппроксимируется сеточной схемой метода конечных разностей на равномерной сетке. Исследуется сходимость и погрешность приближенных собственных значений и приближенных собственных функций. Для иллюстрации полученных теоретических результатов проведены численные эксперименты для модельной задачи. Нелинейные задачи на собственные значения исследовались в работах [1–9], приближенные методы изучены в [10–23]. Теоретические результаты работы могут быть обобщены для задач о собственных колебаниях пластин и оболочек с упруго присоединенными грузами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 19-31-90063, 20-08-01154).

Литература

1. Вычисление минимального собственного значения нелинейной задачи Штурма–Лиувилля / В. С. Желтухин, С. И. Соловьев, П. С. Соловьев, В. Ю. Чебакова // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155 (3). – С. 91–104.
2. Solov'ev, P. S. Solov'ev, V. Yu. Chebakova, A. M. Sidorov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. – Vol. 158. – P. 012102.
3. Existence of solutions for electron balance problem in the stationary radio-frequency induction discharges / V. S. Zheltukhin, S. I. Solov'ev, P. S. Solov'ev, V. Yu. Chebakova // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. – Vol. 158. – P. 012103.
4. Solov'ev S. I. Eigenvibrations of a Beam with Elastically Attached Load // Lobachevskii J. Math. – 2016. – Vol. 37 (5). – P. 597–609.
5. Solov'ev S. I. Eigenvibrations of a Bar with Elastically Attached Load // Differ. Equations. – 2017. – Vol. 53 (3). – P. 409–423.
6. Dautov R. Z., Lyashko A. D., Solov'ev S. I. The bisection method for symmetric eigenvalue problems with a parameter entering nonlinearly // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. – 1994. – Vol. 9 (5). – P. 417–427.
7. Lyashko A. D., Solov'ev S. I. Fourier method of solution of fe systems with hermite elements for Poisson equation // Sov. J. Numer. Anal. Math. Model. – 1991. – Vol. 6 (2). – P. 121–129.
8. Solov'ev S. I. Superconvergence of finite element approximations to eigenspaces // Differ. Equations. – 2002. – Vol. 38 (5). – P. 752–753.
9. Solov'ev S. I. The error of the Bubnov-Galerkin method with perturbations for symmetric spectral problems with a non-linearly occurring parameter // Comput. Math. Math. Phys. – 1992. – Vol. 32 (5). – P. 579–593.

10. Solov'ev S. I. Superconvergence of finite element approximations of eigenfunctions // *Differ. Equations*. – 1994. – Vol. 30 (7). – P. 1138–1146.
11. Solov'ev S. I. Finite element approximation with numerical integration for differential eigenvalue problems // *Appl. Numer. Math.* – 2015. – Vol. 93. – P. 206–214. – URL: http://ezproxy.urfu.ru:2077/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=10&SID=C2oAMHn2qizu9ktMz1c&page=1&doc=14&cacheurlFromRightClick=no
12. Solov'ev S. I. Fast direct methods of solving finite-element grid schemes with bicubic elements for the Poisson equation // *J. Math. Sci.* – 1994. – Vol. 71. – P. 2799–2804.
13. Zhigalko Y. P., Solov'ev S. I. Natural oscillations of a beam with a harmonic oscillator // *Russ. Math. Sci.* – 2001. – Vol. 45 (10). – P. 33–35.
14. Соловьев С. И. Метод конечных элементов для несамосопряженных спектральных задач // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки*. – 2006. – Т. 148 (4). – С. 51–62.
15. Соловьев С. И. Аппроксимация симметричных спектральных задач с нелинейным вхождением параметра // *Известия высших учебных заведений. Математика*. – 1993. – № 10. – С. 60–68.
16. Samsonov A. A., Solov'ev S. I. Eigenvibrations of a beam with load // *Lobachevskii J. Math.* – 2017. – Vol. 38 (5). – P. 849–855.
17. Dautov R. Z., Lyashko A. D., Solov'ev S. I. Convergence of the Bubnov-Galerkin method with perturbations for symmetric spectral problems with parameters entering nonlinearly // *Differ. Equations*. – 1991. – Vol. 27 (7). – P. 799–806.
18. Solov'ev S. I., Solov'ev P. S. Finite Element Approximation of the Minimal Eigenvalue of a Nonlinear Eigenvalue Problem // *Lobachevskii J. Math.* – 2018. – Vol. 39 (7). – P. 949–956.
19. Solov'ev S. I., Solov'ev P. S., Chebakova V. Y. Finite difference approximation of electron balance problem in the stationary high-frequency induction discharges // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 129. – P. 06014.
20. Samsonov A. A., Solov'ev S. I., Solov'ev P. S. Eigenvibrations of a bar with load // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 129. – P. 06013.
21. Samsonov A. A., Solov'ev S. I., Solov'ev P. S. Eigenvibrations of a simply supported beam with elastically attached load // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 224. – P. 04012.
22. Samsonov A. A., Solov'ev S. I. Investigation of eigenvibrations of a loaded bar // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 224. – P. 04013.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРУ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-823

Алмаева К. В.^{1,2}, Литовченко И. Ю.^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: kseni_ya_almaeva@mail.ru

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

Ферритно-мартенситные стали с 12-м % содержанием Сг в настоящее время рассматриваются как перспективные конструкционные материалы для активных зон и внутрикорпусных устройств ядерных и термоядерных энергетических реакторов нового поколения [1, 2]. Предполагаемый температурный интервал их использования определяет необходимость изучения высокотемпературных (650–720 °С) механических свойств (предел текучести, предел прочности, относительное удлинение до разрушения). Также представляет интерес изучение низкотемпературных свойств (вблизи хрупко-вязкого перехода, –70 – –40 °С), поскольку в условиях облучения интервал хрупко-вязкого перехода может сдвигаться в область «положительных» температур.

Повышение механических свойств ферритно-мартенситных сталей достигается с использованием различных термических и термомеханических обработок. Для сталей данного класса в основном применяется традиционная термическая обработка (ТТО), которая заключается в нормализации и высокотемпературном отпуске. Как было показано ранее [1, 2], применение высокотемпературных термомеханических обработок (ВТМО) с пластической деформацией в аустенитной области является одним из способов модификации микроструктуры и повышения прочности ферритно-мартенситных сталей.

В настоящей работе изучено влияние ВТМО с пластической деформацией ($\varepsilon \approx 50\%$) в аустенитной области на особенности микроструктуры и механические свойства стали ЭП-823 (Fe-12Cr-Mo-W-Si-V-W-Nb). Механические испытания на растяжение проводили в области отрицательных температур (–70 – –40 °С) в смеси жидкого азота и этилового спирта, при комнатной температуре на воздухе и при температурах, близких к предполагаемым рабочим ($T = 650\text{--}720\text{ °С}$), в вакууме.

Сравнительные исследования микроструктуры стали ЭП-823 после ТТО и ВТМО методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что ВТМО влияет на следующие изменения: уменьшение плотности грубодисперсных частиц $M_{23}C_6$; повышение плотности дислокаций; увеличение объемной доли и дисперсности наноразмерных частиц типа МХ по сравнению с ТТО.

Испытания на растяжение показали, что в изученном температурном интервале пределы текучести стали ЭП-823 после ВТМО превышают соответствующие значения после ТТО. Это связано с повышением эффективности дисперсного (наноразмерными частицами МХ) и субструктурного (повышенная плотность дислокаций) упрочнения. Наибольший эффект в повышении прочности стали в результате ВТМО достигается при отрицательных температурах (–70 °С). При температурах испытаний, близких к рабочим, активизируются термически зарождающиеся процессы преодоления дислокациями наноразмерных частиц и эффективность дисперсного упрочнения снижается. В интервале температур хрупко-вязкого перехода относительное удлинение стали после ВТМО достигает значений 12,7–14,3 %.

Таким образом, ВТМО ферритно-мартенситной стали ЭП-823 приводит к повышению прочности при сохранении хороших значений пластичности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-38-90139.

Литература

1. Temperature Dependences of Mechanical Properties and Fracture Features of Low-Activation Ferritic-Martensitic EK-181 Steel in a Temperature Range from -196 to 720 °C / N. A. Polekhina, I. Yu. Litovchenko, A. N. Tyumentsev et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2018. – Vol. 81 (7). – P. 1024–1032. – DOI: 10.1134/S1063778818070098.
2. Сравнительное исследование микроструктуры, механических свойств и особенностей разрушения жаропрочных ферритно-мартенситных сталей ЭК-181, ЧС-139 и ЭП-823 в интервале температуры от -196 до 720 °C / Н. А. Полехина, И. Ю. Литовченко, К. В. Алмаева и др. // *Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия Термоядерный синтез*. – 2018. – Т. 41 (4). – С. 38–47.

ПОСТРОЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ РОСТА ТРЕЩИНЫ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПО ДАННЫМ ФРАКТОГРАФИИ

Банников М. В., Билалов Д. А., Оборин В. А., Наймарк О. Б.

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

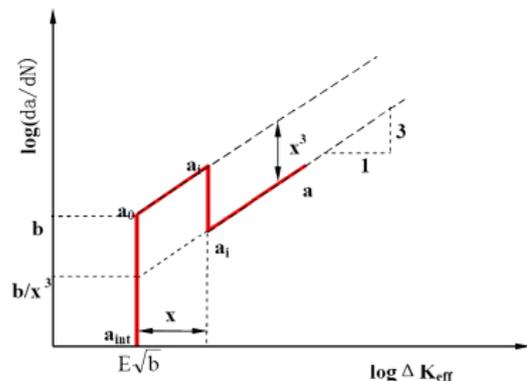
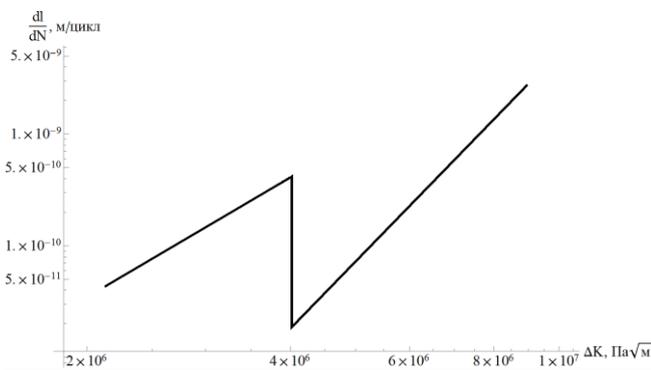
В работе приведено кинетическое уравнение роста усталостной трещины в режиме гигацикловой усталости на основе уравнения Пэриса [1] с масштабнo инвариантными параметрами, которые определяют методами количественной фактографии поверхностей разрушения. Методика «in situ» определения накопления необратимых усталостных повреждений [2], основанная на анализе нелинейных проявлений сигнала обратной связи в замкнутой системе ультразвуковой усталостной установки, позволила разделить различные стадии зарождения и распространения усталостной трещины.

Рассмотрено модифицированное уравнение типа Пэриса следующего вида [3]:

$$\frac{dl}{dN} = l_{sc} \left(\frac{\Delta K}{E\sqrt{l_{sc}}} \right)^\alpha \left(\frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^\beta,$$

где l – длина трещины; N – число циклов; ΔK – коэффициент интенсивности напряжений; E – модуль Юнга; l_{sc} – минимальный пространственный масштаб в окрестности вершины трещины (зоны процесса разрушения), на котором начинают проявляться масштабнo инвариантные закономерности рельефа поверхности разрушения; L_{pz} – масштаб зоны процесса разрушения в вершине трещины; α и β – эмпирические константы.

Масштабы L_{pz} и l_{sc} определяли с использованием разработанной авторами методики [3] по фактографии поверхностей разрушения. На основе данных по измерению амплитуды второй гармоники [2] в режиме реального времени в процессе испытания на усталость удалось установить число циклов, которое ушло на зарождение и рост усталостной трещины в каждой стадии. Две неизвестных константы α и β в уравнении были определены в процессе решения задачи минимизации между экспериментальным и теоретическим числом циклов, необходимых для роста трещины между стадиями. График скорости роста усталостной трещины от размера l_0 до l_k изображен на рисунке *а* и хорошо согласуется с данными [4] на рисунке *б*.



Кинетическая диаграмма роста трещины: *а* – по нашим данным; *б* – по данным [4]

Литература

1. Bathias C., Paris P. C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. – Marcel : Dekker Publisher Co, 2005. – 328 p.

2. Damage evolution in the AlMg6 alloy during high and very high cycle fatigue / M. Bannikov, D. Bilalov, V. Oborin, O. Naimark // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2019. – Vol. 13 (49). – P. 383–395.
3. Масштабная инвариантность роста усталостной трещины при гигацикловом режиме нагружения / В. А. Оборин, М. В. Банников, О. Б. Наймарк, Т. Palin-Luc // *Письма в журнал технической физики*. – 2010. – Том 36 (22). – С. 76–82.
4. Fatigue crack growth from small to long cracks in VHCF with surface initiations / I. Marines-Garcia, P. C. Paris, H. Tada, C. Bathias // *Int. J. Fatigue*. – 2007. – Vol. 29 (9–11). – P. 2072–2078. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.03.015.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИЛОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

Беляев А. Ю., Изюмов Р. И., Свистков А. Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является одним из самых эффективных инструментов исследования микро- и наноструктуры, а также локальных характеристик материалов. В частности, АСМ кажется наиболее перспективным методом исследования эластомерных композитов с нанонаполнителем. Большой интерес представляют механические свойства матрицы вблизи частиц наполнителя. Использование одиночного индентирования не очень эффективно в данном виде исследований, связанных с рядом особенностей метода (скорость, разрешение, характер взаимодействия с поверхностью исследуемого материала). Развитие АСМ привело к появлению множества режимов и приложений. Среди них стоит отметить динамические режимы исследования материалов. Одним из наиболее перспективных динамических методов исследования является метод Force modulation method (FMM) или метод модуляции силы. Развитие метода привело к тому, что с его помощью можно получать карты механических свойств материала на наномасштабах с высоким разрешением.

При исследовании нанокомпозитов на основе полимерной матрицы с частицами наполнителя не так важно нахождение локальных механических свойств материала. Наиболее интересной является информация о межфазных слоях (матрица–наполнитель) и качественные различия локальной жесткости матрицы в пространстве между включениями. В работе предложен метод, позволяющий качественно определить различия в жесткости локально неоднородного материала. Преимуществом метода является небольшое количество констант и возможность построения карт локальной жесткости материала.

Выведены уравнения взаимодействия зонда АСМ с упругой средой. Основание упругого кантилевера колеблется по гармоническому закону. Получены зависимости для связи амплитуды изгиба кантилевера, сдвига фазы колебаний основания кантилевера и жесткостью материала. Полученные выражения могут быть использованы для интерпретации экспериментальных данных и построения карты локальной жесткости материала.

Предложенный метод также позволяет учитывать особенности взаимодействия зонд–поверхность, учитывая такие факторы как адгезия, межмолекулярное взаимодействие, капиллярные эффекты. Учет может быть реализован с помощью уже известных моделей, таких как Джонсона–Кендала–Робертса, Дерягина–Мюллера–Топорова, Маугиса–Дагдейла и др.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00725_а.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

Бывальцев С. В.^{1,2}, Залазинский А. Г.¹, Агапитова О. Ю.¹, Титов В. Г.¹

¹Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: e-mail: s_ikar@mail.ru

²Уральский Федеральный Университет,
19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

Проведено моделирование процесса гидромеханического прессования прутков из алюминиевого сплава марки АМг5 [1]. Представлена построенная в виде экспертной системы программа для выбора технологических параметров процесса гидромеханического прессования. В программе реализованы методы определения оптимальных параметров процесса гидромеханического прессования на основе поиска максимума обобщенного критерия и на основе критерия Парето (рисунок). Исходные данные [2, 3] получают после проведения экспериментальных исследований согласно плану эксперимента [4].

Производится многокритериальная оптимизация по трем критериям: необходимого усилия выдавливания, показателей поврежденности готового изделия и неоднородности деформации по сечению прутка. С учетом значимости каждого из них производится выбор технологических и конструкционных параметров процесса гидромеханического прессования.

EXPERIMENTAL RESULT	
№	→
	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
VALUE OF A VARIED FACTORS	
X1	2 4 6 8 2 4 8 6 8
X2	50 55 60 60 60 60 50 50 55
X3	0.3 0.3 0.3 0.4 0.1 0.2 0.2 0.1 0.1
VALUE OF A OPTIMIZATION PARAMETERS	
Y1	0.338158 0.663158 0.806579 1 0.344737 0.647368 0.834211 0.696053 0.802632
Y2	0.870968 0.580645 0.548387 0.580645 1 1 0.580645 0.548387 0.580645
Y3	0.926606 1 0.954128 0.954128 0.954128 0.954128 0.926606 0.926606 1
WEIGHT COEFFICIENTS	
Kx1	Kx2 Kx3
1	1.5 1
RESTRAINTS	
Y1min	Y2min Y3min
1	0 0
NOULINEAR PROGRAMMING	
X1	X2 x3 Y =
6.8	50 0.1 1.13882
OBJECTIVE PARAMETERS	
MNP	Y1 = 0.740459 Y2 = 0.542655 Y3 = 0.926606
Pareto	Y1 = 0.696053 Y2 = 0.548387 Y3 = 0.926606
PARETO OPTIMIZATION	
№	8 St_Pareto
X1	X2 X3 Y1 Y2 Y3 Y =
6	50 0.1 0 0.548387 0.926606 1.14442

Интерфейс экспертной системы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00339-мол_а.

Литература

1. Agapitova O. Yu., Byvaltsev S. V., Zalazinskiy A.G. Mathematical Modeling of Hydromechanical Extrusion // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1915. – P. 040001.2.
2. Агапитова О. Ю., Бывальцев С. В., Залазинский А. Г. Определение реологических свойств пластопарафина для моделирования процессов обработки металлов давлением // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – № 12 (189). – С. 3–5.

3. Agapitova O. Yu., Byvaltsev S. V., Zalazinskiy A. G. Theoretical and Experimental Investigation of Hydromechanical Extrusion Process // American Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2017. – Vol. 2 (1). – P. 17–23.
4. Byvaltsev S. V., Zalazinskiy A. G., Shveykin V. P. An Intelligent System for Improving the Process of Hydromechanical Extrusion // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2176. – P. 030003.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ВО ВРЕМЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ МНОГОСЛОЙНОЙ НИТЕВОЙ НАВИВКИ

Паршин Д. А.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
д. 101, корп. 1, пр. Вернадского, г. Москва, 119526, Российская Федерация,
e-mail: parshin@ipmnet.ru*

Одним из преимуществ композитных изделий является потенциальная возможность целенаправленного формирования при их изготовлении контролируемых или даже заранее предписанных распределений технологических напряжений. Однако для этого требуется не только качественно понимать механизм развития этих напряжений в конкретном технологическом процессе, но и располагать адекватным количественным описанием этого механизма. Значительную долю применяемых методов изготовления материалов, элементов конструкций и деталей машин составляют разнообразные аддитивные технологии в широком смысле данного термина. При использовании таких технологий изготавливаемые изделия постепенно изменяют свои размеры и форму за счет последовательного присоединения к ним слоев дополнительных материальных элементов. Подобный процесс формирования изделия всегда протекает одновременно с процессом его деформирования под действием сопутствующих нагрузок и физических полей. На основе традиционных подходов механики деформируемого твердого тела проблематично более или менее адекватно описать такого рода процессы деформирования ввиду их особой кинематики. Настоящее исследование опирается на подходы механики растущих деформируемых твердых тел, успешно разрабатываемые в настоящее время в рамках отечественной научной школы, созданной известным ученым механиком и математиком профессором А.В. Манжировым. В представленной работе предложена неклассическая математическая модель процесса послойного изготовления цилиндрических композитных изделий путем многослойной навивки на вращающуюся основу предварительно натягиваемой армирующей нити, погружаемой в затвердевающее связующее. В приближении линейно упругого поведения получаемого композитного материала поставлена и решена соответствующая квазистатическая начально-краевая задача механики растущих тел. Построены замкнутые аналитические зависимости, позволяющие проследить процесс развития напряженно-деформированного состояния изготавливаемого цилиндрического изделия при различных законах изменения во времени параметров моделируемого технологического процесса. Полученные зависимости дают возможность эффективно управлять (путем надлежущего варьирования этих параметров) распределениями технологических напряжений в формируемом изделии, как возникающих и развивающихся в нем в процессе изготовления, так и остающихся по окончании этого процесса. На основе предложенной модели в работе проведены многочисленные числовые расчеты с использованием известных экспериментальных данных об упругих свойствах исследуемых намоточных материалов. Выявленные закономерности обнаруживают не известные ранее эффекты. Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на некоторые механические аспекты аддитивного производства композитных изделий.

Работа выполнена по теме госзадания АААА-А20-120011690132-4 и частично в рамках проектов РФФИ 18-01-00770-а, 18-01-00920-а, 19-51-60001-ЮАР_т.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ С УПРАВЛЯЕМЫМ И НЕУПРАВЛЯЕМЫМ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЕМ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Сараев Ю. Н.¹, Каманцев И. С.², Перовская М. В.¹, Кузнецов А. В.²,
Семенчук В. М.¹, Непомнящий А. С.¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
г. Томск, Российская Федерация

²Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: litsin@ispms.tsc.ru

Введение. Сварка как один из наиболее эффективных способов соединения металлов, является наиболее распространенным при изготовлении конструкций ответственного назначения. Однако несмотря на ее бесспорные преимущества [1] у этого способа металлообработки имеются и недостатки, одним из которых является появление у неразъемных соединений ярко выраженных зон структурной неоднородности [2]. Их появление связано с повторным расплавлением и последующей кристаллизацией металла шва из расплава, когда вновь закристаллизовавшийся металл приобретает структуру, показатели которой существенно отличаются по своим размерам от структурных составляющих свариваемого металла [3, 4].

Ранее выполненные исследования позволили установить основные причины, влияющие на особенности структурообразования зон неразъемных соединений [5]. Обоснованы направления, благодаря которым удастся снизить структурную неоднородность и снизить уровень послесварочных напряжений путем дополнительной упрочняющей обработки [6]. В рамках настоящей работы выполнялись исследования, связанные с изучением особенностей стадий усталостного разрушения, в том числе появления усталостной микротрещины, ее развития и разрушения испытуемого образца.

Цель работы – повышение эксплуатационной надежности сварных соединений металлоконструкций ответственного назначения применением методов сварки с регулируемым тепловложением и дополнительной упрочняющей обработкой зон неразъемных соединений.

Методика и техника эксперимента. В качестве исследуемого материала была выбрана сталь 09Г2С. Сварка осуществлялась с применением электродов УОНИ 13/55 – «Мороз» и оборудования, реализующего способ адаптивной импульсно-дуговой сварки в оборудовании ФЕБ-315 «МАГМА» [7]. Сварка пластин производилась в нижнем положении в два прохода на режимах постоянного тока и с низкочастотной модуляцией энергетических параметров процесса сварки. После окончания сварки полученные образцы подвергались дополнительной упрочняющей обработке. В работе основной акцент был сделан на определении степени влияния поверхностной ударной обработки околошовной зоны сварного соединения стали 09Г2С на усталостную долговечность. Циклическое нагружение осуществлялось на высокочастотной испытательной машине Mikrotron по схеме трехточечного изгиба. Ориентация образца выбиралась из условия реализации максимальных растягивающих напряжений на границе зоны сплавления сварного шва, подвергнутого деформационной обработке. Естественным концентратором служила околошовная зона сварного соединения.

В процессе исследований сопоставлялись результаты испытаний образцов, полученных при сварке на постоянном токе и с низкочастотной модуляцией энергетических параметров процесса сварки, с дополнительной обработкой и без нее. Усилие нагружения рассчитывалось из условия создания в зоне концентратора напряжений, равных 400 МПа. С целью исключения возможного проскальзывания образца на опорах коэффициент асимметрии цикла $R = 0,1$. Контролируемыми параметрами при усталостном нагружении являлись количество циклов нагружения до появления усталостной трещины ($N_{ст}$) и количество циклов до достижения усталостной трещиной заданной длины $l_{тр} = 5$ мм (Нобщ). Момент появления усталостной трещины фиксировался по началу изменения резонансной частоты нагружения

системы «образец–машина» по диаграммам «изменение частоты нагружения – количество циклов».

Результаты исследований и их обсуждение. Из сопоставительного анализа результатов испытаний образцов было выявлено, что поверхностная упрочняющая обработка существенно повышает базовое количество циклов нагружения до появления макротрещины. При этом количество циклов стабильного роста УТ до заданной длины повышается не столь существенно: $N_{роста} = 124\ 000 \dots 273\ 000$ циклам нагружения для образцов, сваренных на постоянном токе без дополнительной упрочняющей обработки, и $N_{роста} = 263\ 000 \dots 300\ 000$ циклам для образцов той же серии, но с предварительной поверхностной обработкой. При оценке влияния поверхностной упрочняющей обработки на образцах, полученных сваркой на режимах низкочастотной модуляции энергетических параметров режима, наблюдается существенный разброс экспериментальных результатов. Так, при циклическом нагружении одного из образцов появление усталостной трещины не наступило вплоть до 3366000 циклов нагружения.

Заключение. В результате выполненных экспериментальных исследований, а также численного моделирования были получены поля возможной кинетики роста усталостной трещины. При сопоставлении результатов испытаний образцов с обработкой околошовной зоны и без нее было установлено, что наличие упрочненного слоя приводит к снижению скорости роста трещины и существенному увеличению инкубационного периода, предшествующему ее зарождению и началу распространения. Полученные результаты коррелируют с экспериментальными данными, полученными ранее, что указывает на возможность использования подходов численного анализа при оценке долговечности и расчета накопленной поврежденности околошовных зон сварных соединений.

Работа выполнена за счет средств РФФ, грант № 16-19-10010-П.

Литература

1. Теория сварочных процессов : учеб. для вузов / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров, В. В. Фролов. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.
2. Control of structure and properties of deposited wear-resistant coatings by modification of the melt of the low frequency modulation take / Yu. N. Saraev, V. P. Bezborodov, M. V. Perovskaya, and V. M. Semenchuk // Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures. – 2019. – 2167. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5132173>
3. Improving the reliability of metallic structures in service in the conditions with low climatic temperatures by efficient application of advanced methods of modification of the zone of the welded joint / Y. N. Saraev, V. P. Bezborodov, S. V. Gladkovskiy, N. I. Golikov // Welding international. – 2017. – Vol. 31. – P. 631–636.
4. Distribution of residual stresses in welded joints in 09G2S steel produced by adaptive pulsed-arc welding / Yu. N. Saraev, V. P. Bezborodov, A. A. Grigorieva, N. I. Golikov, V. V. Dmitriev, and I. I. Sannikov // Welding International. – 2015. – Vol. 29 (2). – С. 131–134.
5. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур. Гл. 5 / Ю. Н. Сараев, С. В. Гладковский и др. // Научно-технические исследования в проектах РФФ. Сибирь / под редакцией С. Г. Псахье и Ю. П. Шаркеева. – Томск: Издательство НТЛ, 2017. – 428 с. – ISBN 978-5-89503-607-5. С. 134–202.
6. Субструктурные и фазовые превращения при ультразвуковой ударной обработке мартенситной стали / В. Е. Панин, В. А. Клименов, В. А. Безбородов и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1993. – № 6. – С. 77–83.
7. Способ адаптивной импульсно-дуговой сварки : пат. 2410216 Рос. Федерация / Сараев Ю. Н., ИФПМ СО РАН. – № 2008124580/02 ; заявл. 16.06.2008 ; опубл. 2011.01.27.

РЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ23 В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ДЕФОРМАЦИИ

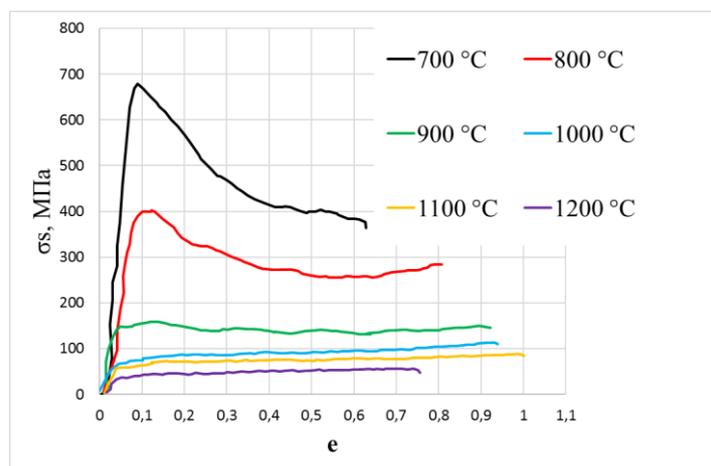
Веселова В. Е.¹, Гладковский С. В.¹, Волков В. П.¹, Салихьянов Д. Р.^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: veselova@itach.uran.ru

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

Известно, что сопротивление высокотемпературной пластической деформации двухфазных титановых сплавов определяется сформировавшимся при заданной температуре нагрева фазовым и структурным составом. В связи с этим цель настоящей работы – изучение реологического поведения двухфазного титанового сплава ВТ23 после предварительного нагрева до различных температур и определение оптимальных параметров высокотемпературной деформационной обработки.

Показатель сопротивления пластической деформации (σ_s) изученного сплава определялся по результатам испытаний круглых образцов диаметром 10 мм и высотой 15 мм на кулачковом пластометре ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН в диапазоне температур 700–1200 °С при скорости деформации $\xi = 1,0 \text{ с}^{-1}$. Согласно представленным на рисунке результатам, при деформации сплава в $(\alpha+\beta)$ -области кривые деформирования имеют выраженные пиковые напряжения при степенях деформации, близких к 0,1, за которыми следуют участки разупрочнения. Значения пиковых напряжений снижаются с повышением температуры деформации от 700 до 160 МПа. При деформации в β -области величина σ_s находится на установившемся уровне 50–150 МПа в зависимости от температуры испытаний. При температурах деформации 900 °С и выше наблюдается резкое изменение формы кривых деформирования и снижение напряжения течения сплава ВТ23, что связывается с рекристаллизацией исходной β -фазы, а также сфероидизацией и рекристаллизацией α -зерен.



Кривые течения титанового сплава ВТ23 при температурах деформации 700–1200 °С

Полученные данные по сопротивлению пластической деформации данного сплава могут быть использованы при выборе режимов его деформационной обработки.

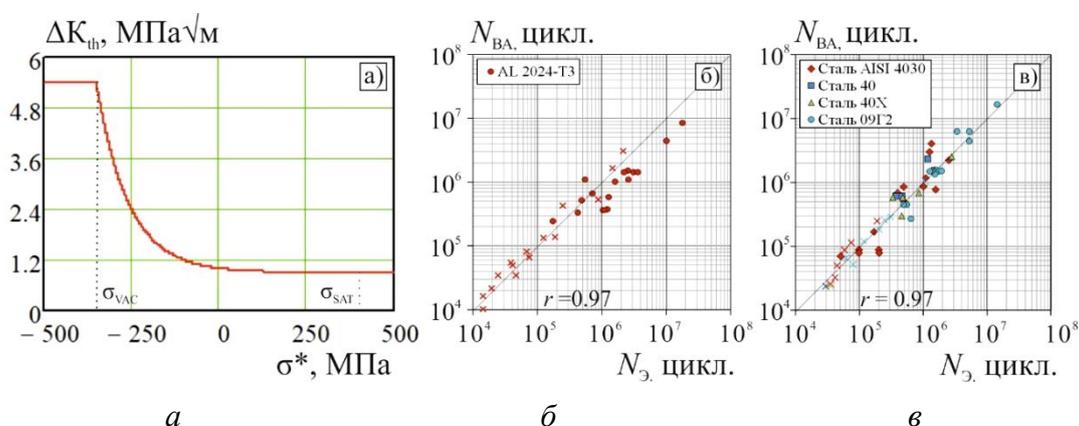
Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00723 мол_а.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МЕСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЕЕ ВЕРШИНЕ

Савкин А. Н., Денисевич Д. С., Седов А. А., Бадиков К. А.

Волгоградский государственный технический университет,
д. 28, пр. Ленина, Волгоград, 400005, Российская Федерация,
e-mail: tfpic@vstu.ru

В настоящее время существует несколько типов моделей прогнозирования роста трещины, а именно: основанные на статистических моделях, на закрытии трещины и на пластичности около вершины трещины. Одним из недостатков первых двух типов является невозможность учета последовательности в истории нагружения, поэтому их нецелесообразно применять при расчете спектрального или других типов нагружений с переменной амплитудой в процессе испытания. Для корректного прогнозирования продолжительности роста усталостных трещин разработана модель, описывающая и объясняющая влияние на развитие усталостной трещины эффектов взаимодействия нагрузок в устье усталостной трещины. Для проведения исследований были выбраны компактные образцы типа С(Т), выполненные из алюминиевого сплава AL 2024-T3 и сталей следующих марок: AISI 4030, 09Г2, 40 и 40X. Испытания проводились при разных типах нагружений и P_{\max} : регулярное с разной асимметрией, блочное нагружение с перегрузками и недогрузками, а также различное квазислучайное нагружение. Использовалась сервогидравлическая испытательная машина BISS Nano 25 kN со специальным программным комплексом. Ввиду наличия сингулярности напряжений у вершины трещины определять местное напряжение вблизи ее вершины необходимо на некотором удалении r^* , причем это расстояние должно быть минимально возможным, чтобы воспроизвести физику явления. В качестве основного соотношения, описывающего кинетику роста трещины для предлагаемой модели, было использовано модифицированное уравнение Формана–Мэтту. Эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K_{\text{эфф}}$ в устье трещины принимали как произведение размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK на коэффициент закрытия трещины U . В основе предлагаемой модели лежит методика расчета локальных напряжений в окрестности трещины и их экспериментально установленная связь с пороговым КИН $\Delta K_{\text{th}} = f(\sigma^*)$. На рисунке показана такая зависимость на примере алюминиевого сплава AL 2024-T3. Таким образом, ΔK_{th} является переменным на каждом цикле нагружения и зависит от последовательности приложенных нагрузок. Кинетика роста трещин определяется уравнением Формана–Мэтту, где ΔK_{th} пересчитывается на каждом возрастающем полцикле нагружения.



Взаимосвязь размаха ΔK_{th} с местным напряжением σ^* для AL 2024-T3 (a);
расчет продолжительности роста трещины с учетом взаимодействия последовательностей
нагрузок по модели пластичности (б, в)

Используется линейное правило определения деформаций в окрестности трещины по модели пластичности. Взаимосвязь результатов применения предложенной модели по оценке продолжительности роста усталостной трещины с учетом локальных напряжений в устье трещины N_{BA} с полученными экспериментальными данными N_s представлена на рисунке *б* и *в*.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ АМПЛИТУДЕ НАГРУЖЕНИЯ

Савкин А. Н., Сундер Р., Седов А. А., Денисевич Д. С., Барышников А. А.

Волгоградский государственный технический университет,
28, пр. Ленина, Волгоград, 400005, Российская Федерация,
e-mail: tfpic@vstu.ru

Цель исследования – подтвердить, что соотношение пороговой величины коэффициента интенсивности напряжений (КИН ΔK_{th}) и остаточным напряжением на кончике трещины σ^* может значительно улучшить оценку остаточной усталостной долговечности для деталей и конструкций, работающих в условиях много- и гигацикловой усталости. При регулярном циклическом нагружении материала с трещиной ΔK_{th} является постоянной материала, однако если нагружение нерегулярное и максимальный КИН цикла K_{max} изменяется в течение испытания, то ΔK_{th} – переменная, которая однозначно связана с σ^* . Значение σ^* зависит от истории нагружения, т. е. последовательности уровней приложенных нагрузок. Амплитуда σ^* определяется циклической неупругой реакцией в вершине трещины.

Влияние истории нагружения на продолжительность роста трещины может быть существенным при эксплуатации компонентов и элементов конструкции. Перегрузки при растяжении оставляют после себя остаточные растягивающие деформации, которые в конечном итоге влияют на закрытие трещины. Учет этой истории при оценке остаточной долговечности требует учета их влияния на σ^* , что в свою очередь контролирует ΔK_{th} .

Существует несколько методик экспериментального определения ΔK_{th} (рис. 1рис.): с постоянным значением минимального напряжения σ_{min} (а); или максимального σ_{max} или с переменным, но с постоянным значением асимметрии R (б). Наименьшими недостатками обладает нагружение на рис. 1 б, так как при этом достигается постоянство максимального КИН цикла K_{max} , а значит, и радиуса монотонной пластической зоны у вершины трещины.

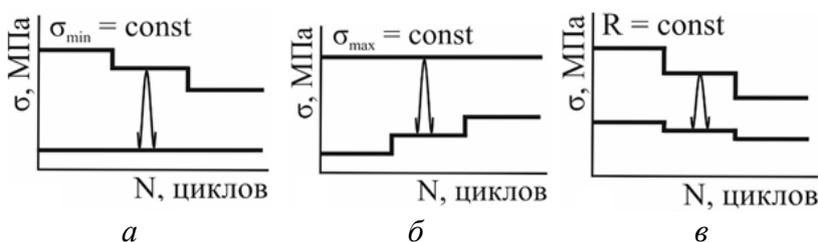


Рис. 1. Типичные нагружения для определения порогового размаха КИН

Авторами была применена модифицированная методика определения зависимости порогового значения КИН от остаточного напряжения на кончике трещины σ^* (рис. 2), которая позволяет определить несколько различных значений ΔK_{th} на одном образце.

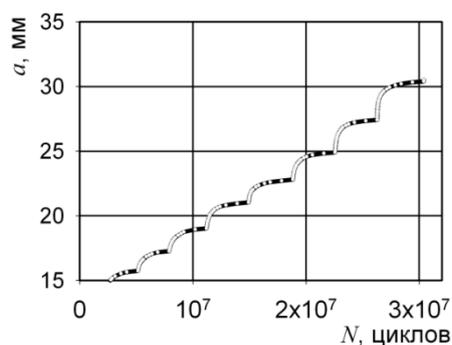


Рис. 2. Кривая роста трещины, записанная во время испытаний по методике определения зависимости ΔK_{th} от σ^*

Изменение значений порогового КИН достигалось приложением различных по уровню перегрузочных циклов нагружения по окончании основной последовательности блоков нагружения, которые были приложены для определения ΔK_{th} . Возможно, что влияние K_{max} и асимметрии нагружения на ΔK_{th} может быть связано с чувствительностью закрытия трещины к этим параметрам.

Можно сделать вывод, что использование в стандартной практике определения зависимости ΔK_{th} от σ^* даст возможность преодолеть давний разрыв между расчетами долговечности материала лабораторных образцов и реальных конструкций.

ELECTROSPINNING OF BIOPOLYMER – POLY-3-HYDROXYBUTYRATE

Olkhov A. A.^{1,2}, Zernova Yu. N.¹, Iordanskii A. L.¹

¹*N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,
4, Kosygin str., Moscow, 119991, Russian Federation*

²*Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny per., Moscow, 117997, Russian Federation,
e-mail: aolkhov72@yandex.ru*

Among the limited number of modern ultrafine fiber technologies (e.g., phase separation, matrix synthesis, self-assembly of peptide-like molecules, etc.), electrospinning (ES) is considered to be one of the most promising methods [1]. The forming of polymer nanofibers under the conditions of electrodynamic interactions and viscoelastic deformations allows us to alter their various structural and morphological characteristics, create a high specific surface area, regulate their mechanical properties and porosity, and use a wide range of diffusion parameters. The use of natural polymers offers additional advantages in the development of fiber and matrix systems for environmental problems and biomedicine. [2]. To create bioresorbable implants, cell engineering matrices, therapeutic systems for targeted drug delivery, and other biomedical articles, a limited range of polymers are used, among which it is necessary to note first of poly-3-hydroxyalkanoates. Natural poly-3-hydroxybutyrate (PHB) has a very simple chemical structure and is the most widespread representative of the PHA family. That is why we studied the effects of the main parameters (viscosity and electric conductivity) of the polymer PHB solution on the possibility of obtaining ultrathin fibers with variable geometry.

The reagents used in this study included PHB with a molecular mass (MM) of 300, 450, and 850 kDa (BIOMER, Germany); chloroform (CF), formic acid (FA), and tetrabutylammonium iodide (TBAI). Formic acid and TBAI was added to adjust the viscosity and electric conductivity. Electrospinning (ES) of nonwoven fiber materials based on PHB was performed on a laboratory unit at a dynamic viscosity of solution of 9 P (0.9 Pa s), specific bulk conductivity of $\sim 10^{-3}$ (Ohm m)⁻¹, electric field voltage of 15 kV, interelectrode distance of 18 cm, capillary diameter of 0.1 mm. The distribution of the fibers obtained from a PHB solution in CF/FA (0.9 : 0.1) in the presence of the TBAI electrolyte according to the diameter was studied by light and electron microscopy. The thermophysical and thermal characteristics of PHB-based fibers were obtained using Perkin Elmer Pyris 6 DSC differential scanning calorimeters. The characteristics of a polymer solution largely determine the geometrical form and morphology of ultrafine PHB fibers obtained by ES.

The transition from droplike to fibrillar structures depends on the important properties of the forming solution such as electric conductivity and viscosity. To obtain cylindrical fibers, low-molecular modifiers such as TBAI and FA, which increase the electric conductivity of the system, were added to the chloroform solution of PHB. In addition, the increase in the viscosity of solutions at higher concentrations and/or MM of the polymer also leads to improved homogeneity of fibers according to thickness and affects the diameter of ultrafine fibers and their distribution width according to the diameter. Modification of the solutions with an ionogen electrolyte (TBAI) and hydrolytic agent (FA) decreases the initial MM of the polymer and leads to an increase in the viscosity of the system, which shows itself as a response to hydrolysis and was taken into account in the physicochemical measurements of the polymer solution at time intervals considerably exceeding the ES times (400 and 3/4 h, respectively). The obtained fibers have found use in biomedicine, in particular, in the design of locomotor elements.

References

1. Controlled-Release Matrixes for Drugs Based on Polyamide-Polyhydroxybutyrate Compositions / A. A. Ol'khov, Yu. N. Pankova, R. Yu. Kosenko, M. A. Gol'dshtrakh, V. S. Markin, A. L. Iordanskii // *Pharmaceutical Chemistry Journal*. – 2018. – Vol. 52 (1). – P. 77–83.
2. Comparative characterization of melt electrospun fibers and films based on PLA-PHB blends: Diffusion, drug release and structural features / Y. Liu, K. Cao, S. Karpova, A. Olkhov, A. Filatova, A. Zhulkina, A. Burkov, S. V. Fomin, D. S. Rosa, A. L. Iordanskii // *Macromol. Symp.* – 2018. – 381. – 1800130.

РОЛЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОЕДИНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА

Саркеева А. А.¹, Гладковский С. В.², Лутфуллин Р. Я.¹,
Круглов А. А.¹, Мулюков Р. Р.¹

¹*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН,
д. 39, ул. Ст. Халтурина, Уфа, 450001, Российская Федерация,
e-mail: aigul-05@mail.ru*

²*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

Титановые сплавы благодаря комплексу полезных свойств широко применяются в различных отраслях промышленности. Одним из перспективных направлений является использование титановых сплавов в виде слоистой композиции, что является наиболее привлекательным при разработке различных броневых элементов. С механической точки зрения значительный интерес к слоистым материалам обусловлен тем, что в них возможно достижение высокого сопротивления ударному разрушению благодаря наличию в них внутренних поверхностей соединения, которые могут ограничить распространение трещин. При этом свойства самих поверхностей соединения и их расположение относительно направления действия ударной нагрузки является определяющим. Свойства соединений определяются особенностями микроструктуры на границе раздела слоев, в частности наличием пор в зоне твердофазного соединения (ТФС), полученного сваркой давлением.

Работа посвящена исследованию поведения при ударном нагружении слоистого материала, полученного сваркой давлением (СД) титановых заготовок, в зависимости от расположения поверхностей соединения относительно направления действующей нагрузки и относительной протяженности пор в зоне ТФС.

Слоистый материал получали СД семи листовых заготовок толщиной ~1,5 мм из промышленного титанового сплава ВТ6 со средним размером зерен α -фазы ~3 мкм. Сварку давлением проводили при разных температурах, способствующих получению различной относительной протяженности пор в зоне ТФС. Для проведения испытаний на ударный изгиб использовали стандартные образцы с размерами 10×10×55 мм³, соответствующие типу 1 по ГОСТ 9454-78. Слоистые образцы отличались расположением U-образного надреза относительно поверхностей соединения. В образце с «разветвляющимся» трещину расположением поверхностей соединения (Р-образец) линия надреза была расположена перпендикулярно поверхностям соединений так, что трещина распространялась одновременно через все слои. В образце с «тормозящим» трещину расположением поверхностей соединения (Т-образец), линия надреза была расположена параллельно поверхностям соединений так, что трещина распространялась последовательно через каждый слой. Испытания проводили на маятниковом копре Tinius Olsen IT542M с записью диаграмм ударного нагружения.

Результаты испытаний на ударный изгиб показали, что с увеличением относительной протяженности пор в зоне ТФС ударная вязкость Р-образца снижается, а Т-образца – повышается. Особенностью природы ударного разрушения образцов слоистого материала с наличием пор в зоне ТФС является образование по поверхностям соединений расслоений, которые расположены перпендикулярно направлению распространения магистральной трещины. Способность образцов к появлению расслоений возрастает с увеличением относительной протяженности пор в зоне соединения.

Анализ полученных данных показал, что роль поверхностей соединения в поведении при ударном нагружении слоистого материала, полученного сваркой давлением титановых заготовок, зависит от наличия/отсутствия пор в зоне ТФС. Поверхности соединения с порами способствуют ударному разрушению материала при распространении трещины одновременно через все слои (Р-образец), а при распространении трещины последовательно через каждый слой (Т-образец) представляют собой эффективные барьеры.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОМУ НАГРУЖЕНИЮ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Саркеева А. А.

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН,
д. 39, ул. Ст. Халтурина, Уфа, 450001, Российская Федерация,
e-mail: aigul-05@mail.ru*

Важное место среди современных конструкционных материалов занимают титановые сплавы. Сплавы типа ВТ6 (Ti-6Al-4V) благодаря комплексу полезных свойств широко используются для изготовления многослойных конструкций методами сварки давлением и сверхпластической формовки [1–3]. В целом, при создании изделия в виде многослойной конструкции появляются дополнительные возможности улучшения его свойств. Известно, что слоистые материалы могут значительно улучшить многие механические свойства, включая вязкость разрушения, усталостные и ударные характеристики, износостойкость, коррозию и демпфирующую способность, а также обеспечить лучшую формуемость [4].

В процессе эксплуатации многослойные конструкции подвергаются интенсивному воздействию различных нагрузок в том числе ударной. В результате воздействия таких нагрузок, могут произойти значительные повреждения, которые могут привести к серьезным авариям и материальным потерям. В этой связи крайне важной является информация о поведении материала многослойных конструкций при действии ударных нагрузок для обеспечения их долговечности и надежности, которые определяются главным образом сопротивлением материала развитию трещин.

Отличительной особенностью многослойных материалов и конструкций по сравнению с монолитными является наличие поверхностей твердофазного соединения большой протяженности, которые играют существенную роль в их механическом поведении. Поверхности соединения в зависимости от их расположения относительно направления действующей нагрузки различным образом влияют на сопротивление ударному разрушению слоистых материалов [4, 5].

Работа посвящена исследованию механического поведения при ударном нагружении трехслойного материала, полученного сваркой давлением двух плит толщиной 30 мм и промежуточного листа толщиной 1 мм промышленного титанового сплава ВТ6. Для проведения исследований были изготовлены три вида слоистых образцов, в которых поверхности соединения были расположены по типу торможения трещины (Т-образец, трещина распространяется последовательно через каждый слой), разветвления трещины (Р-образец, трещина распространяется одновременно через все слои) и вдоль направления распространения трещины (В-образец).

Механическое поведение слоистого материала проанализировано с учетом результатов количественной оценки ударной вязкости, работы зарождения и распространения трещины, динамической трещиностойкости, а также результатов металлографических и фрактографических исследований.

Литература

1. Weisert E. D., Stacher G. W. Fabricating titanium parts with SPF-DB process // Metal Progress. – 1977. – Vol. 3. – P. 33–37.
2. Сафиуллин Р. В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Ч. I. Международный опыт // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2 (1). – С. 32–35.
3. Comley P. N. Lowering the heat. The development of reduced SPF temperature titanium alloys for aircraft production // Mater. Sci. Forum. – 2004. – Vols. 447–448. – P. 233–238.

4. Mechanical behaviour of laminated metal composites / D. R. Lesuer, C. K. Syn, O. D. Sherby, J. Wadsworth, J. J. Lewandowski, W. H. Hunt // International Materials Reviews. – 1996. – Vol. 41 (5). – P. 169–197.
5. The fracture of mild steel laminates / J. D. Embury, N. J. Petch, A. E. Wraith, E. S. Wright // Trans. Met. Soc. AIME. – 1967. – Vol. 239. – P. 114–118.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ УСИЛЕНИЯ СТОЕК КОНИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ

Макаров Г. Н.¹, Шалыгин М. Г.²

¹АО «Нокиа Солюшнз энд Нетворкс», Брянск, Российская Федерация,
e-mail: makarov_g.n.89@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», Брянск, Российская Федерация,
e-mail: migshalugin@yandex.ru

Стойки конические железобетонные центрифугированные согласно ГОСТ 22687.1-85 [1] предназначены для опор высоковольтных линий электропередачи, эксплуатирующихся в I–VII районах по давлению ветра и в I–V гололедных районах согласно СП 20.13330.2016 [2]. При использовании их по назначению проявляют хорошие показатели эксплуатационной пригодности и долговечности [3]. Однако, в недавнее время конические стойки начали массово применяться операторами сотовой связи в качестве опор для металлических антенных башенных надстроек. Башенная надстройка представляет собой пространственную конструкцию (в большинстве случаев являющуюся пространственной консольной фермой) состоящую из металлических элементов (уголков, труб, швеллеров, круглого проката и т. п.) и предназначена для установки на нее антенно-фидерного оборудования (панельных, секторных, радиорелейных антенн, внешних радиомодулей, фидеров и пр.).

Основные критерии работоспособности (несущей способности) АМС с применением стоек:

1. Изгибающий момент в основании АМС.
2. Ширина раскрытия трещин в стойке.
3. Устойчивость на опрокидывание (закрепления стойки в грунте).
4. Линейные перемещения (деформации) АМС.
5. Эквивалентные напряжения в металлоконструкциях.
6. Отклонение вертикального положения стойки от проектного положения.

Анализ литературных источников и статистических данных показывает, что в большинстве случаев, при расчетах несущая способность антенно-мачтовых сооружений с применением стоек конических железобетонных не обеспечивается по критериям изгибающего момента и устойчивости на опрокидывание. Поэтому, проектные организации, специализирующиеся на разработке проектов усиления данных сооружений, уделяют особое внимание уменьшению величины изгибающего момента в основании АМС и предлагают

Выявлено, что применение железобетонной обоймы уменьшает величину изгибающего момента на 31,2 %, металлической обоймой – на 29,9 %. Применение усиления с использованием свайного фундамента и металлических ростверков обеспечивает уменьшение величины изгибающего момента на 15,8 %, при этом увеличение предельной горизонтальной силы составляет 5,9 раза, что вызвано перераспределением изгибающего момента. При применении обойм наибольшие изгибающие моменты находятся в узле закрепления стойки в грунте, а при применении свайных фундаментов – на уровне верхнего стяжного кольца на отметке +3,000 м. Горизонтальная сила, стремящаяся лишить стойку устойчивости, распределяется между сваями.

Представленные результаты будут актуальны при разработке и изготовлении усиления стоек конических железобетонных.

Литература

1. Щуцкий В. Л., Дедух Д. А., Гриценко М. Ю. Планирование эксперимента при исследовании свойств центрифугированного бетона : научное обозрение. – 2016. – № 12. – С. 89–96.
2. Щуцкий В. Л., Шилов А. В., Тапилова Т. Д. Прочность конических опор линий электропередач с учетом ограничений по второй группе предельных состояний. Интернет журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Т 8 (12). – URL: <http://naukovedenie.ru>
3. Исследование работы конических опор линий электропередач в качестве стоек для антенных башенных / В. Л. Щуцкий, А. П. Коробкин, А. С. Шевченко, С. А. Стельмах // Интернет журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2017. – Т 9 (4). – URL: <http://naukovedenie.ru>

СТРУКТУРА АНТИГИПЕРТЕНЗИВНОЙ ТЕРАПИИ У АМБУЛАТОРНЫХ ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ

Шамбатов М. А.¹, Изможерова Н. В.², Попов А. А.³, Бахтин В. М.²

¹ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава РФ,
3, ул. Репина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация,
e-mail: shambatovma@gmail.com

²ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава РФ, Кафедра фармакологии и клинической фармакологии,
3, ул. Репина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава РФ, Кафедра госпитальной терапии и скорой медицинской помощи,
3, ул. Репина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация

Распространенность артериальной гипертензии (АГ) в Российской Федерации находится в диапазоне 30–45 % от общей популяции, значительная доля лиц, страдающих АГ, представлена пациентами старшей возрастной группы [1]. В связи с преимущественным применением комбинированной терапии артериальной гипертензии и высокой распространенностью коморбидных заболеваний при терапии АГ часто встречается полипрагмазия – одновременное назначение большого количества лекарственных препаратов, приводящее к непредсказуемым лекарственным взаимодействиям, проявляющимся в виде нежелательных побочных эффектов [2].

Цель исследования – оценка структуры медикаментозной терапии пациентов с АГ у амбулаторных пациентов с учетом коморбидных заболеваний.

В ходе одномоментного исследования получены следующие результаты. Постоянную антигипертензивную терапию получали 127 чел. (90,7 %), 10 чел. (7,1 %) принимали антигипертензивные препараты исключительно при кризах, 3 респондента (2,1 %) не получали медикаментозной терапии. Среди лиц, постоянно принимающих антигипертензивные препараты, 117 чел. (85,40 %) получали комбинированную терапию, 20 (14,60 %) получали один препарат. Для анализа полученных результатов все пациенты были разделены на 2 группы: 1-я группа – пациенты, при лечении которых одновременно применялось менее 5 ЛП (82 чел. (58,57 %)), 2-я группа – пациенты, при лечении которых использовалась комбинация более чем из 5 ЛП (58 (41,43 %) чел.).

При сравнении групп получены следующие результаты: медиана значения ИМТ среди пациентов 2-й группы статистически значимо выше, чем в 1 (p < 0,05). Среди пациентов 2-й группы чаще встречались коморбидные заболевания (p < 0,05). Пациенты 2-й группы имеют более тяжелое течение артериальной гипертензии (p < 0,05), в связи с чем во 2-й группе и доля пациентов, получающих статины и антиагреганты, значительно выше, чем в 1-й группе (p < 0,05). Статистически значимых различий при сравнении доли пациентов, достигших целевых значений АД, не получено.

Выводы:

1. Структура антигипертензивной терапии в целом соответствует рекомендациям, большинство пациентов получает комбинированную антигипертензивную терапию, при этом крайне редко выявлялась полипрагмазия в узком понимании этого термина – лечение одной нозологии 5 и более ЛП.

2. Среди пациентов, которым рекомендован одновременный прием 5 и более ЛП, выше частота выявления сопутствующей патологии, в том числе заболеваний сердечно-сосудистой системы, СД 2 типа, избыточной массы тела и ожирения, что обуславливает высокий сердечно-сосудистый риск.

3. Полипрагмазия в исследуемой выборке обусловлена более частым назначением препаратов, влияющих на прогноз – гиполипидемических средств и антиагрегантов.

Литература

1. Артериальная гипертензия среди лиц 25–64 лет: распространенность, осведомленность, лечение и контроль. По материалам исследования ЭССЕ / С. А. Бойцов et al. // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2014. – № 13 (4). – С. 4–14.
2. Максимов, М. Л., Дралова О. В., Ермолаева А. Комбинированная гипотензивная терапия. Полипрагмазия или необходимость? // Артериальная гипертензия. – 2011. – № 17 (3). С. 216–221.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Малашенко В. В.^{1,2}, Малашенко Т. И.^{3,4}

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина,
72, ул. Р. Люксембург, Донецк, 283114,
e-mail: malashenko@fti.dn.ua

²Донецкий национальный университет, 24, ул. Университетская, Донецк, 283001

³Донецкий национальный технический университет, 58, ул. Артема, Донецк, 283000

⁴Донецкий национальный университет экономики и торговли, 31, ул. Щорса, Донецк, 83050

Применение легирующих добавок является широко распространенным способом улучшения механических свойств различных сплавов. Их влияние на свойства сплавов при квазистатической деформации исследовано достаточно подробно. Однако в случае высокоскоростной деформации характер этого влияния, в частности зависимость от концентрации добавок, претерпевает существенные изменения, связанные с изменением механизма диссипации энергии движущихся дислокаций. Это происходит при использовании сварки взрывом, при ударно-волновом воздействии, при воздействии на кристаллы лазерными импульсами высокой мощности, при использовании метода динамического канально-углового пресования и при высокоскоростной обработке. При этом скорость пластической деформации достигает значений $10^3 - 10^9 \text{ s}^{-1}$ [1], а дислокации движутся со скоростями $v \geq 10^{-2}c$, где c – скорость распространения поперечных звуковых волн в кристалле, преодолевая встречающиеся потенциальные барьеры без помощи тепловых флуктуаций. Это так называемая динамическая область скоростей.

Существенное влияние на движение дислокаций, а следовательно, и на механические свойства кристаллов, оказывает динамическое взаимодействие дислокаций с другими дефектами кристаллической структуры с атомами второго компонента в двухкомпонентных сплавах и зонами Гинье–Престона, образующимися в этих сплавах на первой стадии старения.

Исследуемый в этой работе механизм диссипации заключается в необратимом переходе кинетической энергии поступательного движения дислокации в энергию ее изгибных колебаний в плоскости скольжения, которые возникают при взаимодействии дислокаций с зонами Гинье–Престона и атомами меди. Как следует из теории динамического взаимодействия дислокаций со структурными дефектами [2–4], динамика дислокаций при таком механизме диссипации зависит от вида спектра дислокационных колебаний, прежде всего от наличия щели в дислокационном спектре. Главную роль в рассматриваемой задаче играют коллективное взаимодействие растворенных атомов с дислокацией и коллективное взаимодействие остальных дислокаций ансамбля с этой дислокацией. Конкуренция этих взаимодействий определяет и формирование спектральной щели, и величину силы динамического торможения дислокаций. Сила этих взаимодействий зависит главным образом от концентрации растворенных атомов и плотности дислокаций. Предел текучести сплава является немонотонной функцией концентрации второго компонента, при определенных условиях имеющей максимум и минимум. Максимум соответствует переходу от доминирующего влияния коллективного взаимодействия дислокаций на формирование спектральной щели к доминированию влияния коллективного взаимодействия атомов второго компонента. Минимум полученной кривой соответствует переходу от доминирования торможения дислокации зонами Гинье–Престона к доминированию торможения атомами второго компонента.

Литература

1. High strain rate deformation of layered nanocomposites / J. Lee, D. Veysset, J. Singer, M. Retsch, G. Saini, T. Pezeril, K. Nelson, E. Thomas // Nature Communication. – 2012. – No. 3. – P. 1164.

2. Малашенко В. В. Подавление скачков пластической деформации магнитным полем при низкотемпературном деформировании двухкомпонентных сплавов // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45 (12). – С. 6–8.
3. Малашенко В. В. Влияние зон Гинье–Престона на концентрационную зависимость предела текучести состаренных двухкомпонентных сплавов в условиях высокоскоростной деформации // ФТТ. – 2019. – Т. 61 (10). – С. 1845–1848.
4. Malashenko V. V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B: Phys. Cond. Mat. – 2009. – Vol. 404 (2). – P. 3890–3892.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА ТЕРМОУСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА

Авруцкий В. В.¹, Першин А. В.¹, Бычков Н. Г.¹, Зинин А. В.²

¹ФГУП ГНЦ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ЦИАМ),
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: abb@rtc.ciam.ru

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: allzin@yandex.ru

Циклическое нагружение деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) связано с повторяющимися в каждом полете запуском, выходом на максимальные значения нагрузок и температур, полетом на крейсерском режиме, уменьшением тяги при посадке и выключении двигателя. Каждый выход на взлетный режим приводит к существенному увеличению неравномерности температурного поля деталей двигателя [1]. Интенсивное малоцикловое и статическое нагружение происходит с одновременным действием вибрационных напряжений, вызывающих многоцикловую усталость материала деталей [2].

В настоящее время известны экспериментальные исследования при термоциклировании и вибрациях в образцах и натурных деталях, однако проблема в целом не решена, так как нет достаточных данных, позволяющих создать методы расчета на одновременное действие перечисленных нагрузок. Одна из причин отсутствия общепризнанных подходов к оценке прочности деталей двигателя с учетом двухчастотного характера нагружения связана со сложностями при проведении таких испытаний.

В ЦИАМ разработана и изготовлена модифицированная испытательная машина коффиновского типа, обеспечивающая проведение термоциклических испытаний образцов в условиях двухчастотного нагружения. Для экспериментального исследования термоциклической долговечности лопаточного сплава в условиях комбинированного нагружения были изготовлены образцы из жаропрочного сплава ЖС6У [3]. Испытания проводились в температурном режиме 100 °С ↔ 950 °С, без выдержки на максимальной температуре. Размах упругопластической деформации в течение термоцикла для трех режимов нагружения образца составлял 0,5 %, 1 % и 2 %, соответственно.

Анализ изменения долговечности при двухчастотном нагружении по сравнению с равным по суммарным амплитудам циклической деформации одночастотным нагружением, выполненный на основе результатов экспериментальных исследований долговечности, показал значительное снижение долговечности материала в условиях воздействия дополнительных циклических нагрузок повышенной по сравнению с основным нагружением частоты [4].

Литература

1. Дульнев Р. А., Котов П. И. Термическая усталость металлов. – М. : Машиностроение, 1980. – 200 с.
2. Кузнецов Н. Д. Проблемы термоциклической прочности деталей ГТД // Проблемы прочности. – 1978. – № 6. – С. 3–7.
3. Авруцкий В. В., Першин А. В., Хамидуллин А. Ш. Совершенствование установки П926 для испытаний материалов на термоусталость при наложении дополнительных вибрационных нагрузок : тезисы доклада на Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». – М. : ЦИАМ, 2015. – С. 5.
4. Гаденин М. М. Исследование повреждаемости и долговечности конструкций при одно- и двухчастотных режимах нагружения на основе деформационных и энергетических подходов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83 (6). – С. 44–52.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Сызранцев В. Н.¹, Антонов М. Д.²

*Тюменский индустриальный университет,
38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: v_syzrantsev@mail.ru; antonovmd@icloud.com*

Важным этапом оценки технического состояния газопроводов является определение их прочностной надежности в процессе эксплуатации. Для решения этой задачи необходимо знать функцию $f_\sigma(\sigma)$ плотности распределения возникающих в процессе эксплуатации трубопровода напряжений (σ) и функцию плотности $f_s(s)$ предельных напряжений (s) – предела текучести (предела прочности), отражающих механические свойства материала трубы [1].

В практике определения надежности трубопроводов основное применение получили методики, в которых для функций $f_\sigma(\sigma)$ и $f_s(s)$ принимается нормальный закон распределения. В то же время обработка фактических данных по величине напряжений, возникающих в трубе при эксплуатации газопроводов, свидетельствует, что подчинение их нормальному распределению является исключением, а в общем случае распределение σ законами, разработанными в рамках параметрической статистики, описаны быть не могут [1]. Аналогичная ситуация имеет место и в случае принятия нормального закона для s . Так, например, в работах [2, 3] показано, что вероятность отказа трубопровода при учете фактического, а не нормального закона распределения s для одной и той же стали, выпускаемой различными предприятиями, отличается на порядок.

Эффективным направлением решения проблемы повышения достоверности результатов расчета прочностной надежности изделий является отказ от описания функций $f_\sigma(\sigma)$ и $f_s(s)$ с использованием законов параметрической статистики и переход к их восстановлению на основе имеющихся выборок случайных величин $\sigma_i, i=1, m$ и $s_j, j=1, k$ методами непараметрической статистики [1–4].

С использованием аппарата непараметрической статистики на основе квантильных значений случайной величины авторами разработан алгоритм расчета коэффициентов функции плотности ее распределения, заданной в виде конечного тригонометрического ряда, также представлен пример реализации данного алгоритма.

Литература

1. Estimation of Safety and Durability of Technological Pipelines by Methods of Nonparametric Statistics / V. N. Syzrantsev, V. V. Novoselov, P. M. Sozonov, S. L. Golofast. – Novosibirsk : Nauka, 2008. (In Russian).
2. Golofast S. L. Assessment of the effect of the mechanical properties of 17G1S pipe steel of various manufacturers on the strength reliability of the main pipelines. – Exposition Oil Gas. – 2018. – Iss. 7. – P. 20–25.
3. Golofast S. L. Problems of Reliability Assessment for Linear Part of Trunk Pipelines // Occupational Safety in Industry. – 2018. – Vol.4. – P. 36–40.
4. Syzrantseva K., Syzrantsev V. Reliability Estimation of Machine Parts with Complicated Geometry on a Base of Methods of Nonparametric Statistics // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11 (2). – P. 204–209.

МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

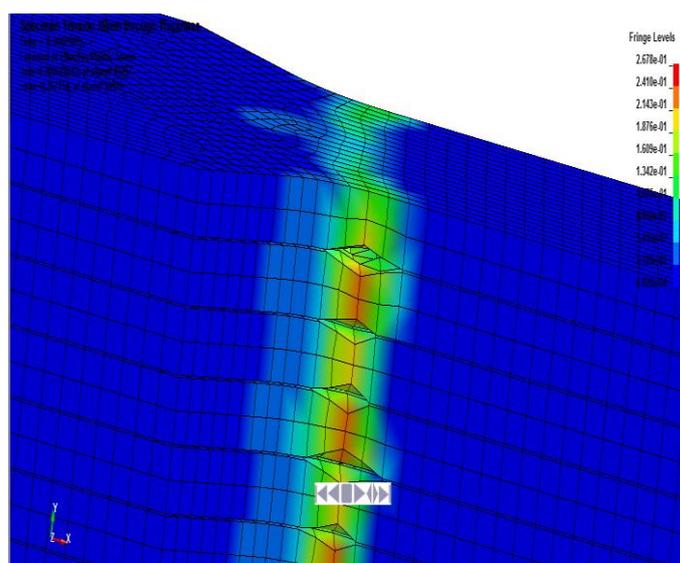
Путырский С. В., Плохих А. И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва,
д. 5, стр. 1, 2-я Бауманская ул., Российская Федерация,
e-mail: s.putirskiy@gmail.com; plokhikh@bmstu.ru

Перспективным классом конструкционных материалов являются многослойные металлические материалы, которые обладают повышенным сопротивлением ударным нагрузкам и усталостному разрушению, однако имеют низкие значения относительного удлинения [1–3].

Для анализа поведения многослойного материала, полученного горячей пакетной прокаткой на основе титановых сплавов разных структурных групп, был использован метод конечно-элементного моделирования, реализованный в программе LS-Dyna. Была исследована модель, состоящая из семи чередующихся через один мягких и твердых слоев.

Расчеты, основанные на гипотезе неразрывной связи между слоями, показали, что формирование шейки в мягком слое возможно только после образования свободных поверхностей, т. е. при разрушении соседних более твердых слоев, что в предельном случае может приводить к образованию скола в направлении перпендикулярном плоскости проката. Однако полученные результаты противоречили данным фрактографического анализа образцов, разрушенных при одноосном статическом растяжении.



Участок локального расслоения

В уточненном варианте расчета была заложена возможность нарушения неразрывной связи на межслойных границах образца. Установлено, что разрушению многослойного материала предшествует локализация пластического течения в мягких слоях, что приводит к нарушению связи между отдельными слоями (рисунок). Именно локализация деформации, вызванная наличием ненарушенных связей с соседними слоями вблизи очага разрушения, приводит к низким значениям общего удлинения многослойного образца при одноосном растяжении. Результаты, полученные при моделировании, согласуются с результатами механических испытаний и фрактографического анализа.

Дальнейшие исследования показали, что предложенный механизм разрушения многослойных материалов, полученных на основе сплавов титана, справедлив также и для материалов, полученных горячей пакетной прокаткой на основе сталей различных структурных групп, а также сплавов на основе алюминия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00125 «Исследование механизма разрушения двухфазных титановых сплавов при статическом и циклическом нагружении в условиях морского базирования авиационной техники» в 2013–2015 гг.

Литература

1. Structure and properties of a steel-based multilayer material produced by hot pack rolling / T. I. Tabatchikova, A. I. Plokhikh, I. L. Yakovlev, S. Yu. Klyueva // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2013. – Vol. 114 (7). – P. 580–592.
2. Production-and microstructure-based fatigue assessment of metallic AISI 304/430 multilayer materials produced by hot pack rolling / A. Schmiedt, L. Luecker, A. Kolesnikov, A. I. Plokhikh, F. Walther // *Materialpruefung*. – 2017. – Vol. 59 (2). – С.123–129.
3. Исследование структуры и свойств многослойных материалов на основе титановых сплавов / А. И. Плохих, С. В. Путырский, Н. А. Ночовная, А. Л. Яковлев, С. Д. Карпухин // *Титан*. – 2016. – № 4 (54). – С. 13–20.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Липатникова Я. Д.¹, Соловьева Ю. В.¹, Старенченко В. А.¹, Белов Н. Н.¹,
Валуйская Л. А.², Черепанов Д. Н.¹

¹*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
2, пл. Соляная, Томск, 634003, Российская Федерация,
e-mail: yanna_lip@mail.ru*

²*Сибирский государственный медицинский университет,
2, Московский тракт, Томск, 634050, Российская Федерация*

Цель работы – установление причин потери устойчивости однородной пластической деформации кристаллических материалов. В ряде случаев результатом пластической неустойчивости является формирование областей сильно локализованной пластической деформации или полос интенсивного сдвигообразования (суперлокализации пластической деформации) [1]. Такого типа неустойчивости пластического течения наблюдались в натуральных экспериментах при деформации монокристаллов атомноупорядоченных интерметаллидов со сверхструктурой $L1_2$ [2].

Исследование проводилось теоретическим методом в рамках многоуровневой трехмерной модели, сочетающей методы описания деформации в терминах дислокационной кинетики сплавов со сверхструктурой $L1_2$ и в терминах механики деформируемого твердого тела [3]. Численная реализация этой синтетической модели проведена в программном комплексе «РАНЕТ-3» методом конечных элементов.

В рамках описанного способа моделирования проведены численные эксперименты на динамическое сжатие и растяжение образцов прямоугольной формы. В результате проведенных расчетов выяснилось, что если параметры модели дислокационной кинетики были заданы таким образом, что деформационная кривая имела немонотонную форму, т. е. предполагала наличие стадии структурного разупрочнения материала образца, то это приводило к неустойчивости пластического течения и формированию полос интенсивного сдвигообразования при динамическом сжатии. При этом существенным оказалось условие интенсивности стадии структурного разупрочнения материала образца: неустойчивость пластического течения наблюдалась только при условии быстрого падения напряжений кривой упрочнения материала. Наличие концентраторов напряжения на поверхности деформируемого образца в виде разрезов в значительной степени усиливало формирование полос интенсивного сдвигообразования.

В условиях динамического растяжения в отсутствие концентраторов напряжений неустойчивость пластического течения была связана с формированием шейки (сужения) образца. В некоторых случаях образование шейки сочеталось с формированием полос суперлокализации. Наличие концентраторов напряжений при определенных условиях усиливало формирование полосы суперлокализации и подавляло образование шейки.

Таким образом, в результате данной работы сформулированы условия проявления неустойчивости пластического течения в виде полос суперлокализации пластической деформации, рассмотрено влияние факторов структурного и геометрического упрочнения и разупрочнения материала образца.

Литература

1. Скворцова Н. П., Кривандина Е. А., Каримов Д. Н. Локализация пластической деформации в кристаллах фтористого кальция при повышенных температурах // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50 (4). – С. 639–643.

2. Суперлокализация деформации в монокристаллах Ni_3Ge со сверхструктурой L1_2 / В. А. Старенченко, Ю. В. Соловьева, Я. Д. Фахрутдинова, Л. А. Валуйская // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55 (1). – С. 62–73.
3. Исследование процессов локализации пластической деформации методом компьютерного моделирования / В. А. Старенченко, Л. А. Валуйская, Я. Д. Фахрутдинова, Ю. В. Соловьева, Н. Н. Белов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55 (2). – С. 76–87.

ВОЗДЕЙСТВИЕ БЕТА-БЛОКАТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИНФАРКТА МИОКАРДА ПРИ ОСТРОМ КОРОНАРНОМ СИНДРОМЕ БЕЗ ПОДЪЕМА СЕГМЕНТА ST

Хусаинова Д. Ф.¹, Аникин Е. В.², Соколова Л. А.¹, Давыдова Н. С.¹

¹ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России,

д. 3, ул. Репина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация,
e-mail: husainovad@mail.ru, lasokolova48@mail.ru, davidovaeka@mail.ru

²МБУ «Станция скорой медицинской помощи имени В.Ф. Капиноса»,
д. 2, ул. Саперов, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация,
e-mail: udjin69@mail.ru

Применение бета-адреноблокаторов (БАБ) в лечении острого коронарного синдрома (ОКС) является необходимым, так как эта группа препаратов не только обладает антиишемическим эффектом, но и является основной с позиции ограничения зоны инфаркта миокарда (ИМ) [1]. Раннее использование БАБ позволяет ограничить зону некроза, снизить риск развития фибрилляции желудочков, ранних разрывов миокарда, летальность больных [2].

Цель исследования – выявить формирование ИМ у пациентов с ОКС без подъема сегмента ST (ОКСБПST), получивших парентерально препарат беталок на догоспитальном этапе.

Материалы и методы исследования. Проведено ретроспективное исследование 145 пациентов с диагностированным ОКСБПST на догоспитальном этапе, госпитализированных в Уральский институт кардиологии. Пациенты были разделены на две группы: получившие беталок парентерально – 73 чел. и группа сравнения – 72 чел. Назначение беталока осуществлялось по общепринятым критериям показаний и противопоказаний. Дозу беталока подбирали индивидуально от 5 до 15 мг ($8,8 \pm 3,8$) и вводили внутривенно по 5 мг каждые 5 мин. в зависимости от клинического эффекта. В стационаре диагноз ИМ устанавливали в соответствии с четвертым универсальным определением. Побочных эффектов при парентеральном применении беталока не зарегистрировано. Летальных исходов от любых причин и развития фатального ИМ в исследуемых группах не выявлено. Медиана возраста пациентов группы беталока составила $53 \pm 9,6$ ($32 \div 82$) года, в группе контроля $56 \pm 9,8$ ($36 \div 83$) лет. Отношение мужчин и женщин в группе беталока – 56 чел. (76,7 %) / 17 чел. (23,3 %), в контрольной группе 51 (70,8 %) / 21 (29,2 %) соответственно. Статистический анализ материала проведен с помощью программы Statistica 12,0. Различия между группами рассчитаны по t-критерию. Дискретные данные представлены в виде общего числа и процентного соотношения.

Результаты и обсуждения. У пациентов получивших парентерально беталок, ИМБПST без зубца Q развился в 15 случаях (20,5 %), в группе контроля – у 16 пациентов (22,2 %), различия не достоверны ($p > 0,05$). ИМБПST с зубцом Q развился у 1 пациента (1,4 %) в группе беталока и у 5 (6,9 %) – в группе контроля ($p > 0,05$). Развитие ИМПST без зубца Q в группе беталока зарегистрировано у 4 (5,5 %) пациентов, в контрольной группе – у 5 пациентов (6,9 %), различия также недостоверны ($p > 0,05$). Исследуемые группы достоверно различались по количеству развившихся ИМПST с зубцом Q и общему количеству диагностированных ИМ ($p < 0,05$). В группе беталока ИМПST с зубцом Q развился у 1 чел. (1,4 %), в контрольной группе – у 7 чел. (9,7 %), общее количество ИМ в группе беталока составило 21 (28,8 %) и в группе контроля – 33 (45,8 %). Первичных ИМ в группе беталока диагностировано у 18 чел. (24,7 %), в контрольной группе – 27 (37,5 %), вторичных ИМ в группе беталока 5 (6,8 %), в группе контроля – 6 (8,3 %), различия не достоверны ($p > 0,05$). Развитие ИМ, в том числе ИМПST с Q, достоверно ниже в группе пациентов, которым был введен беталок на этапе скорой медицинской помощи. В группе беталока также меньше развилось ИМБПST с Q – 1 чел. (1,4 %) по сравнению с контрольной группой – 5 (6,9 %).

Заключение. Раннее парентеральное применение бета-блокатора у пациентов с ОКСБПСТ на догоспитальном этапе показано и оправдано, так как ведет к уменьшению зоны ишемии и развития ИМ.

Литература

1. Хусаинова Д. Ф., Холкин И. В., Соколова Л. А. Факторы, влияющие на эффективность догоспитальной тромболитической терапии при остром коронарном синдроме с подъемом сегмента ST // Врач скорой помощи. – 2014. – № 5. – С. 4–10.
2. Диагностика и лечение больных с острым коронарным синдромом без подъема сегмента ST электрокардиограммы. Рекомендации Общества специалистов по неотложной кардиологии, рекомендовано МЗ РФ / под ред. М. Я. Руда. – М. : ООО «Издательство ГРАНАТ», 2015. – 102 с.

РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ ТАКТИКИ «РАНДЕВУ» НА ДОГОСПИТАЛЬНОМ ЭТАПЕ ОКАЗАНИЯ СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

Хусаинова Д. Ф.¹, Федоров В. В.², Соколова Л. А.¹, Акимова А. В.¹, Миронов В. А.¹

¹ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России,

д. 3, ул. Ретина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация,
e-mail: husainovad@mail.ru; lasokolova48@mail.ru

²ГБУЗ СО «Станция скорой медицинской помощи город Первоуральск»,
д. 16, ул. Прокатчиков, г. Екатеринбург, 623106, Российская Федерация,
e-mail: fedorov@prvsmp.ru

В настоящее время Станция скорой медицинской помощи (СМП) г. Первоуральска работает в составе межмуниципального центра. В связи с этим приходится решать вопросы доставки пациентов с отдаленных территорий (как территории городского окр. Первоуральск, так и прилегающих окр. Староуткинского и Шалинского) в г. Первоуральск. Также Станция участвует в работе программы сосудистой помощи населению Свердловской обл. и своими силами организует доставку больных стационаров города в сосудистый центр ОКБ № 1. Активно используется тактика «рандеву» (rendezvous) – вызов «на себя» реанимационной бригады СМП и движение к ней навстречу с пациентом, не прекращая интенсивной терапии [1, 2]. Этот прием впервые предложил В.А. Фиалко на Станции СМП г. Свердловска.

Цель работы – оценить результативность тактики «рандеву» при доставке пациента на отдаленные расстояния на этапе СМП.

Материалы и методы исследования: Проведено ретроспективное исследование 168 пациентов, доставленных по маршруту г. Шаля – г. Первоуральск за 2017–2019 гг. Медиана возраста пациентов – 51 (34 ÷ 68) лет. Отношение мужчин и женщин – 101 (60 %) / 67 (40 %). Территория обслуживания вызовов 7000 км². Фельдшерская бригада, начинающая госпитализацию пациента, вызывает «на себя» из г. Первоуральска специализированную бригаду. На промежуточной базе (подстанции № 3 п. Новоуткинска) специализированная бригада СМП принимает больного и самостоятельно продолжает госпитализацию, оказывая пациенту необходимую экстренную и неотложную помощь.

Результаты и обсуждения. Из года в год госпитализация пациентов из отдаленных районов тактикой «рандеву» увеличивается. В 2017 году госпитализировано по этой методике 11 чел., в 2018 г. – 68 чел., в 2019 г. – 89 чел. Все пациенты в 2017 г. госпитализированы с диагнозом острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК) – 11 чел. (100 %). В 2018 г. 59 чел. (87 %) госпитализированы с диагнозом ОНМК, 6 чел. (9 %) с диагнозом острый коронарный синдром (ОКС), 1 чел. (1 %) с травмой, 2 чел. (3 %) – с другой патологией. В 2019 г. 10 чел. (11 %) госпитализированы по поводу ОКС, 61 чел. (69 %) с диагнозом ОНМК, 8 чел. (9 %) с травмами различной тяжести, 10 чел. (11 %) с другой патологией. Время обслуживания пациентов сократилось у бригад СМП сельских подстанций с 140±25 до 60±4 мин. Ускорились время первичного контакта врача бригады интенсивной терапии с больным на 75±7 мин.

Выводы. Госпитализация пациентов из отдаленных районов с помощью тактики «рандеву» участилась на 78 случаев за 3 года и имеет преимущества как для пациентов, имеющих возможность получить квалифицированную экстренную врачебную помощь раньше, так и для бригад СМП, которые имеют возможность быстрее вернуться в свой населенный пункт.

Литература

1. Алехин Г. Г. Первая помощь как особый вид помощи // Молодой ученый. – 2018. – № 43. – С. 31–32. – URL <https://moluch.ru/archive/229/53396/> (дата обращения: 31.01.2020).
2. Искандаров И. Р., Гильманов А. Неотложная медицинская помощь (обзор литературы) // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–1. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=19318> (дата обращения: 31.01.2020).

АНТИТРОМБОТИЧЕСКАЯ ТЕРАПИЯ У БОЛЬНЫХ С ОСТРЫМ КОРОНАРНЫМ СИНДРОМОМ С ПОДЪЕМОМ СЕГМЕНТА ST НА ЭТАПЕ СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

Хусаинова Д. Ф.¹, Холкин И. В.², Соколова Л. А.¹, Акимова А. В.¹, Миронов В. А.¹

¹ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России,

д. 3, ул. Репина, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация,

e-mail: husainovad@mail.ru; lasokolova48@mail.ru; anna_v_akimova@mail.ru; vatironov2013@yandex.ru

²МБУ «Станция скорой медицинской помощи имени В.Ф. Капиноса»,

д. 2, ул. Саперов, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация,

e-mail: igor-kholkin@mail.ru

Острый коронарный синдром (ОКС) – одна из патологий, наиболее часто встречающихся в практике врача скорой медицинской помощи (СМП). Патогенез этого состояния связывают с формированием нестабильной атеросклеротической бляшки, ее последующим разрывом и образованием на изъязвленной поверхности тромба окклюзирующего просвет сосуда. По данным коронароангиографии, тромбоз артерии выявляется более чем в 90 % случаев ОКС с подъемом сегмента ST [1]. Эти данные определяют важную роль средств, влияющих на систему гемостаза, в лечении пациентов с инфарктом миокарда [2].

Цель исследования – оценить результативность антитромбоцитарной терапии у больных с ОКС с подъемом сегмента ST (ОКСспST) на догоспитальном этапе.

Материалы и методы. Проведено ретроспективное исследование больных с ОКСспST, обратившихся за помощью в СМП за 2017–2019 гг. в г. Екатеринбурге. Диагноз на догоспитальном этапе ставили на основании жалоб, анамнеза, объективного осмотра и изменений на ЭКГ. Медиана возраста пациентов 52 (42 ÷ 64) лет. Соотношение мужчин и женщин – 63 % / 37 %. Дискретные переменные представлены в виде процента от общего числа.

Результаты и обсуждения. За 2017 г. бригады СМП обслужили 2366 пациентов с диагнозом ОКСспST, в 2018 г. – 2344 чел., в 2019 г. – 2371 чел. Возросло количество пациентов, получивших тромболитическую терапию (тенектеплазой): 225 чел. (9,5 %) в 2017 г.; 241 чел. (10,3 %) в 2018 г.; 259 чел. (10,9 %) в 2019 г. Эноксапарин натрия (клексан) используется в составе тромболитической терапии с такой же частотой. Использование клопидогрела (плавикс) возросло с 7,4 % (175 чел.) в 2017 г. до 14,1 % (334 чел.) в 2019г. Практически всем пациентам на протяжении периода наблюдения активно назначалась ацетилсалициловая кислота (кардиомагнил) – до 95–96 %. С учетом данных исследования ATLANTIC разработан опросный лист для решения вопроса о назначении тикагрелора 180 мг на этапе СМП. Критерии включения: возраст старше 18 лет, появление клиники ОКС более 30 мин., но менее 6 ч, впервые выявленный стойкий подъем сегмента ST ≥ 1 мм как минимум в 2 смежных отведениях ЭКГ, планируемое выполнение первичного чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ). Критерии исключения: ожидаемое время от первой записи ЭКГ до выполнения ЧКВ в условиях стационара более 120 мин. и все противопоказания для данного препарата.

Выводы. За последние годы возросла активность антитромботической терапии при ОКСспST на этапе СМП – использование тенектеплазы и эноксапарина натрия на 1,4 %, клопидогрела на 6,7 %, ацетилсалициловой кислоты до 95–96 %. При решении вопроса о преимуществах ведения пациентов с ОКСспST возможно применение нагрузочной дозы тикагрелора на этапе СМП в г. Екатеринбурге.

Литература

1. Баглай Ю. С. Современный взгляд на тройную антитромботическую терапию. Инновации в науке: научный журнал. – 2018. – № 5 (81). – С. 16–23.
2. Хусаинова Д. Ф., Холкин И. В., Соколова Л. А. Мониторинг качества тромболитической терапии при остром коронарном синдроме на догоспитальном этапе // Терапия. – 2018. – № 7–8. – С. 106–111.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СПЛАВОВ МЕДИ С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

Хомская И. В.¹, Разоренов С. В.², Шорохов Е. В.³, Зельдович В. И.¹,
Абдуллина Д. Н.¹, Фролова Н. Ю.¹, Хейфец А. Э.¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
д. 18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: khomskaia@imp.uran.ru

²Институт проблем химической физики РАН,
д. 1, пр. Семенова, Черноголовка, Московская область, 142432, Российская Федерация
³Российский федеральный ядерный центр-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина,
д. 13, ул. Васильева, Снежинск, Челябинская область, 456770, Российская Федерация

В последние годы становятся актуальными исследования механических свойств субмикроструктурных (СМК) и нанокристаллических (НК) металлов и сплавов при различных экстремальных воздействиях, в том числе субмикросекундной прочности в условиях ударного сжатия [1]. В то же время использование самих высокоэнергетических или экстремальных воздействий открывает возможность получения объемных СМК и НК материалов за счет импульсных источников энергии, без применения энергоемкого прессового оборудования. Метод динамического канально-углового прессования – ДКУП является одним из таких способов воздействия и представляет собой высокоскоростной (10^5 с^{-1}) вариант известного квазистатического метода РКУП [2].

Цель работы – исследование влияния дисперсности кристаллической структуры меди и сплавов меди, полученной методом ДКУП в один–четыре прохода ($n = 1-4$) на ее сопротивление деформированию и разрушению при ударно-волновом нагружении. Объектами исследования служили техническая медь и электротехнические дисперсионно-твердеющие микро- и низколегированные сплавы $\text{Cu}-0,03 \text{ мас. \% Zr}$, $\text{Cu}-0,1 \text{ мас. \% Cr}$ меди. Для получения информации о количественных характеристиках процессов деформирования и разрушения анализируемых материалов была проведена серия ударно-волновых экспериментов с непрерывной регистрацией профилей скорости свободной поверхности образцов при помощи лазерного интерферометра, имеющего временное разрешение $\sim 1 \text{ нс}$. Измерения проводились в условиях ударного сжатия с давлением 5,6–7,0 ГПа и скоростью деформации $(0,9-2,0) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Показано, что измельчение зерна при ДКУП ($n = 1$) от 100 до 0,5–1,0 мкм увеличивает динамический предел упругости и динамический предел текучести меди в 6 раз. Дальнейшее диспергирование структуры при ДКУП ($n = 4$) до 0,05–0,40 мкм увеличивает динамическую (откольную) прочность меди в 1,4 раза по сравнению с ее значением в исходном крупнокристаллическом (КК) состоянии. Показано, что ДКУП ($n = 3$) сплавов Cu-Zr и Cu-Cr , приводящее к измельчению кристаллитов от 300 до 0,2–0,4 мкм, увеличивает в 1,9 и 2,8 раза динамический предел упругости и динамический предел текучести и в 1,5 раза – откольную прочность сплава Cu-Cr , по сравнению с исходным КК состоянием. Таким образом, можно отметить следующие особенности деформационного поведения СМК+НК меди и СМК сплавов меди, полученных методом ДКУП, в условиях ударного сжатия при субмикросекундных длительностях нагрузки: возрастание характеристик упруго-пластического перехода, увеличение критического разрушающего напряжения при отколе и затягивание процесса откольного разрушения по сравнению с КК аналогами.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № АААА-А18-118020190116-6 и при частичной поддержке РФФИ (грант № 18-03-00102).

Литература

1. Разоренов С. В., Гаркушин Г. В. Упрочнение металлов и сплавов при ударном сжатии // ЖТФ. – 2015. – Т. 85 (7). – С. 77–82.
2. Способ динамической обработки материалов : пат. 2283717 РФ / Шорохов Е. В., Жгилев И. Н., Валиев Р. З. – 2006, Бюл. № 26. – 64 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181

Литовченко И. Ю., Полехина Н. А., Алмаева К. В., Аккузин С. А.

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

*Национальный Исследовательский Томский государственный университет,
пр. Ленина 36, Томск, 634050, Российская Федерация*

Ферритно-мартенситные стали с содержанием хрома 9–12 % рассматриваются в качестве конструкционных материалов, в том числе в качестве оболочек тепловыделяющих элементов ядерных и термоядерных реакторов нового поколения. По сравнению с традиционно применяемыми для этих целей аустенитными сталями они имеют низкую склонность к радиационному набуханию при высоких дозах облучения. Использование в реакторах свинцового теплоносителя предполагает всестороннее исследование его влияния на коррозионную стойкость, стабильность структурно-фазового состояния, особенности пластической деформации и разрушения конструкционных материалов.

В настоящей работе методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии с применением элементного микроанализа изучено влияние длительной (3000 ч) выдержки при 600 °С в свинцовом теплоносителе на структурно-фазовое состояние, особенности пластической деформации и разрушения малоактивируемой российской ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (Fe–12Cr–1,1W–0,25V–0,08Ta–0,006B–0,15C–0,04N).

Что в условиях длительной выдержки в теплоносителе на поверхности образцов формируется неоднородный рыхлый слой толщиной 5–25 мкм, представленный оксидами типа Fe₂O₃, Fe₃O₄ и Cr₂O₃. Под поверхностным слоем уменьшается содержание хрома и увеличивается содержание железа, по сравнению с объемом материала. Это связано с интенсивной диффузией хрома на поверхность с образованием оксидных пленок.

Микроструктура объема образцов после длительного контакта с жидким свинцом не претерпевает качественных изменений, по сравнению с состоянием после традиционной термической обработки (ТТО). Количественные изменения заключаются в незначительном увеличении ширины мартенситных ламелей, повышении плотности и некотором увеличении размеров частиц вторых фаз – грубодисперсных M₂₃C₆ и наноразмерных V(C, N). Эти изменения обусловлены длительной выдержкой при 600 °С.

Исследования микроструктуры образцов, деформированных при температурах 20; 680; 700 и 720 °С после выдержки в теплоносителе, в сравнении с состоянием после ТТО показали ее качественное подобие. При 20 °С пластическая деформация развивается путем искривления и фрагментации мартенситных ламелей. При высоких температурах вблизи области шейки наблюдается динамическая полигонизация, рекристаллизация и динамическое деформационное старение. При этом выделяются новые дисперсные частицы M₂₃C₆ и V(C, N), плотность и размеры которых увеличиваются, по сравнению с недеформированным состоянием. Длительная выдержка в теплоносителе интенсифицирует процессы динамической полигонизации, рекристаллизации и динамического деформационного старения, по сравнению с состоянием после ТТО.

В процессе фрактографических исследований сделан вывод, что длительная выдержка в жидком свинце не изменяет характер разрушения образцов стали ЭК-181 при температурах 20; 680; 700 и 720 °С по сравнению с состоянием после ТТО. Вблизи интервала рабочих температур (680–720 °С) разрушение имеет вязкий характер с чашечным изломом. При 20 °С, помимо чашечного излома наблюдаются отдельные элементы скола и макротрещины.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-48-700020.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ УПРУГИХ ВОЛН

Мишакин В. В., Гончар А. В., Кириков С. В., Ключников В. А.

*Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ ФИЦ ИПФ РАН,
85, ул. Белинского, г. Н. Новгород, 603024, Российская Федерация,
e-mail: imndt31@mts-nn.ru*

Металлические листы обычно обладают заметной упругой анизотропией упругих свойств. При пластическом деформировании материала общая анизотропия определяется преимущественной ориентацией зерен, вызванной деформацией.

Одним из эффектов, используемых при контроле акустическим методом, является эффект акустического двулучепреломления, который можно описать с помощью параметра акустической анизотропии A . Эффект проявляется в различии скоростей распространения поперечных волн, распространяющихся в одном направлении, но поляризованных перпендикулярно относительно друг друга [1]. Параметр A связан с коэффициентом функции распределения ориентировок $W420$ [2]. Накопление микрповреждений влияет на процесс изменения кристаллографической текстуры и, соответственно, на интенсивность изменения параметра A . Настоящая работа направлена на изучение влияния пластической деформации и образование мезодефектов на параметр акустической анизотропии,

Параметр A пропорционален разности квадратов скоростей или времен поперечных волн и обратно пропорционален сумме квадратов скоростей или времен продольной и поперечных волн. Сумма квадратов не зависит от кристаллографической текстуры [2], что позволяет избежать измерения толщины листа.

Проведены испытания на статическое деформирование сталей 20 и 09Г2С и измерены времена распространения сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек направлению растяжения. Скорость изменения параметра A существенно уменьшается по мере приближения к предельному значению деформации материала (соответствующему точке образования шейки).

Процесс изменения параметра A из-за накопления мезодефектов (дислокации, распределенные по границам зерен) [3, 4] в процессе пластического деформирования был численно промоделирован для модельного поликристалла со случайной ориентацией зерен.

Обнаружено, что внутренние напряжения, обусловленные наличием мезодефектов, накапливающихся на границах зерен, оказывают существенное влияние на кристаллографическую текстуру и акустическую анизотропию. Таким образом, измерение параметра акустической анизотропии позволяет осуществлять оценку состояния материалов, подвергаемых пластическому деформированию.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00637).

Литература

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М. : Изд-во Мир, 1972. – 308 с.
2. Allen D., Sayers C. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique // Ultrasonics. – 1984. – Vol. 22 (4). – P. 179–188.
3. Zisman A. A., Rybin V. V. Basic configurations of interfacial and junction defects induced in a polycrystal by deformation of grains // Acta Materialia. – 1996. – Vol. 44 (1). – 403–407.
4. Rybin V. V., Perevezentsev V. N., Kirikov S.V. Formation of strain-induced broken dislocation boundaries at faceted grain boundaries // Physics of Metals and Metallography. – 2018. – 119 (5). – P. 421–429.

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕКСТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Мишакин В. В.¹, Серебряный В. Н.², Гончар А. В.¹

¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ ФИЦ ИПФ РАН,
85, ул. Белинского, г. Н. Новгород, 603024, Российская Федерация,
e-mail: imndt31@mts-nn.ru

²ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
49, пр. Ленинский, г. Москва, 119334, Российская Федерация,
e-mail: vserebryany68@gmail.com

При усталостном нагружении металлических сплавов происходят сложные структурные изменения: образование микронесплошностей (микропор, микротрещин и т. д.), изменение дислокационной структуры, кристаллографической текстуры и другие процессы, связанные с деградацией материала. Все эти структурные изменения влияют на упругие константы материала, а также на связанные с ними акустические характеристики: скорость и затухание ультразвуковых волн, акустическую анизотропию [1–2]. В модели Сайерса [3] установлена количественная связь коэффициентов функции распределения ориентировок (ФРО) с упругими константами и скоростями ультразвуковых объемных волн для материалов с ромбической симметрией образца и кубической симметрией кристаллографической решетки. Используя только акустические измерения, определить эти изменения в отдельности не представляется возможным. Количественную информацию о текстуре в виде коэффициентов ФРО можно также получить, используя математические методы восстановления ФРО по экспериментально измеренным прямым полюсным фигурам рентгенографическими методами. Совместные количественные исследования текстуры материалов с помощью ФРО акустическими, рентгенографическими или нейтронографическими дифракционными методами открывают возможности для отдельного анализа изменения текстуры и упругих свойств материалов в различных деформационных процессах.

В работе были проведены исследования изменения текстур и упругих свойств в результате многоциклового усталостного нагружения образцов из малоуглеродистой стали 15ЮТА с помощью рентгенографического количественного текстурного анализа и ультразвуковых объемных волн. Установлено, что изменение остроты текстуры связано с процессами развития микропластических деформаций и накопления микроповреждений. Что параметр, характеризующий остроту текстуры, можно использовать как индикатор предразрушения материала при мониторинге материала конструкции ультразвуковым методом.

В результате использования послойного анализа текстуры по толщине листа, удалось добиться хорошего совпадения усредненных по толщине рентгеновских коэффициентов ФРО с соответствующими акустическими коэффициентами. Это позволило оценить влияние многоциклового усталостного нагружения на изменение текстуры и упругих характеристик листов горячекатаной стали 15ЮТА. При достижении микротрещин при усталостных испытаниях после 55 000 циклов произошло увеличение остроты основных ориентировок, особенно в поверхностных слоях листа, а также проникновение поверхностного типа текстуры на глубину до 0,2 толщины с обеих сторон листа данной стали. Такое изменение текстуры сопровождалось уменьшением основных упругих характеристик стали, обусловленным разрыхлением материала в процессе усталостных испытаний вследствие понижения его плотности.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00637).

Литература

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М. : Изд-во Мир, 1972. – 308 с.

2. Измерение характеристик текстуры конструкционной стали 15 ЮТА акустическим методом при усталостном разрушении / В. В. Мишакин, В. Н. Серебряный, А. В. Гончар, В. А. Ключников // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84 (7). – С. 30–34.
3. Sayers C. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1982. – Vol. 15 (11). – P. 2157–2167.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ КОМБИНИРОВАННОГО НАПОЛНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Ушканов А. А., Слепцова С. А.

*Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
58, Белинского, Якутск, 677000, Российская Федерация,
e-mail: alexanderushkanov@mail.ru, ssard@yandex.ru*

В настоящее время полимеры и материалы на их основе серьезно потеснили такие основные конструкционные материалы, как железобетон, металл, дерево. Возможности полимерных материалов чрезвычайно широки благодаря многообразию полимеров и наполнителей, неисчерпаемой вариативности составов композитов на их основе и методов их модификации [1]. Среди полимеров, применяемых для изготовления деталей узлов трения, наиболее предпочтительным комплексом физико-механических и триботехнических свойств обладает политетрафторэтилен (ПТФЭ), он используется в узлах трения наиболее ответственных технических систем [2].

Цель работы – исследование физико-механических, триботехнических и термодинамических параметров полимерных композиционных материалов (ПКМ) комбинированного наполнения на основе ПТФЭ.

Объектами исследования служили ПТФЭ и композиты на его основе, содержащие в качестве наполнителей углеродные волокна (УВ) или базальтовые волокна (БВ) с функциональными добавками, такими как ФОРУМ® и активированный оксид алюминия (Al_2O_3).

Композиты получали сухим смешением навесок компонентов с последующим формированием из смеси образцов, необходимых для испытаний, методом холодного прессования. Полученные образцы спекали в муфельной печи при температуре 375 °С, после чего производили калибровку для корректировки формы образцов и устранения последствий термической усадки при спекании. Для увеличения адгезии и структурирующей активности между ПТФЭ и наполнителями в работе использовали технологию механоактивации в планетарной мельнице Активатор-2S (Россия). Основные технические характеристики были получены по стандартным методикам.

Результаты исследования показали, что использование наполнителей различной природы в определенном сочетании приводит к значительному улучшению свойств композитов на основе ПТФЭ. С повышением содержания наполнителей происходит увеличение значений энтальпии и энтропии плавления, что свидетельствует о более активных структурных процессах в композите. В исследовании ПКМ методом рентгеноструктурного анализа наблюдается повышение степени кристалличности. Видимо, это связано с тем, что происходит влияние комплекса наполнителей на процессы структурообразования полимерной матрицы. Для исследования ползучести в качестве объекта был выбран композит с содержанием 18 мас. % базальтового волокна и 0,5 мас. % Al_2O_3 акт. Выбор этого объекта обусловлен тем, что образец показал повышенную износостойкость – в 1500 раз выше, чем исходный ПТФЭ, а также высокую прочность, превышающую исходный полимер на 40–50 %. Ползучесть исследованного композита меньше в 2,8 раза, чем чистый полимер.

Литература

1. Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы. Ч. 1. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
2. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена / А. А. Охлопкова, П. Н. Петрова, С. Н. Попов, С. А. Слепцова // Российский химический журнал. – 2008. – Т. LII (3). – С. 147–152.

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ИНДЕНТОРА ПРИ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ПОКРЫТИЯ NiCrBSi–Cr₃C₂ НА ЕГО МИКРОТВЕРДОСТЬ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Николаева Е. П.¹, Соболева Н. Н.², Макаров А. В.^{1,2}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: e.kat.n@mail.ru, av-mak@yandex.ru

²Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: natashasoboleva@list.ru

Современным способом нанесения покрытий на поверхность является лазерная наплавка. Она применяется как в целях восстановления изношенных поверхностей, так и для получения слоев с улучшенными свойствами на новых изделиях [1]. Композиционные покрытия NiCrBSi–Cr₃C₂ используют в авиационной и других высокотехнологичных отраслях промышленности благодаря способности эффективно сопротивляться износу, коррозии и окислению при высоких температурах [2, 3].

Физико-механические свойства сплавов могут быть существенно улучшены путем перевода структуры поверхностных слоев в субмикро- и нанокристаллическое состояние, что может достигаться методами поверхностного пластического деформирования [4]. Одним из таких методов является фрикционная обработка скользящим индентором. Фрикционная обработка позволяет обеспечить как эффективное деформационное упрочнение поверхностного слоя деталей, так и формирование качественных поверхностей с пониженной шероховатостью [5–6], что является важным для практического применения.

В работе исследовались изменения значений микротвердости поверхности и параметров шероховатости после фрикционной обработки при нагрузке 700 Н скользящими инденторами из различных материалов по поверхности покрытия NiCrBSi–Cr₃C₂, сформированного лазерной наплавкой, по сравнению с характеристиками покрытия в шлифованном состоянии.

Установлено, что фрикционная обработка индентором из синтетического алмаза и мелкодисперсного кубического нитрида бора позволяет достичь больших значений микротвердости покрытий по сравнению со значениями микротвердости покрытий в шлифованном состоянии и обработанного индентором из твердого сплава. Однако наименьшие значения параметров шероховатости достигаются после обработки индентором из твердого сплава.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ МК-391.2019.8 и в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по темам № АААА-А18-118020190116-6 и «Лазер». Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Brückner F. and Lepski D. Laser Cladding // Springer Series in Materials Science. – 2017. – Vol. 119. – P. 263–306. Dowden J., Schulz W. (eds) The Theory of Laser Materials Processing. Springer Series in Materials Science, vol 119. Springer, Cham
2. Advanced chromium carbide-based hardfacings / A. Zikin, I. Hussainova, C. Katsich, E. Badisch, C. Tomastik // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 206. – P. 4270–4279.
3. High temperature corrosion studies of cermet particle reinforced NiCrBSi hardfacings / H. Rojacz, A. Zikin, C. Mozelt, H. Winkelmann, E. Badisch // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 222. – P. 90–96.
4. Effect of nanostructuring frictional treatment on the properties of high-carbon pearlitic steel. Part I: microstructure and surface properties // R. A. Savrai, A. V. Makarov, I. Yu. Malygina, E. G. Volkova // Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. A734. – P. 506–512.

5. Improving the properties of the 12Kh18N10T austenitic steel by nanostructuring frictional treatment / A. V. Makarov, P. A. Skorynina, A. L. Osintseva, A. S. Yurovskikh, R. A. Savray // *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)=Metal Working and Material Science*. – 2015. – Vol. 4 (69). – P. 80–92. (In Russian).
6. Tribological aspects in nanostructuring burnishing of structural steels / V. P. Kuznetsov, A. V. Makarov, S. G. Psakhie, R. A. Savrai, I. Yu. Malygina, N. A. Davydova // *Physical Mesomechanics*. – 2014. – Vol. 17 (4). – P. 250–264.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ ХРОМОМОЛИБДЕНОВОЙ СТАЛИ

Скобелина Е. К.^{1,2}, Веселов И. Н.¹, Михайлов С. Б.²

¹ОАО «РосНИТИ»,

30, Новороссийская, Челябинск, 454139, Российская Федерация,
e-mail: SkobelinaEK@tmk-group.com; VeselovIN@tmk-group.com

²ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
19, Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: msb.immt@gmail.com

В работе с использованием магнитных и дилатометрических методов исследования рассмотрено влияние различных режимов термической обработки на фазовые превращения, протекающие в низколегированной хромомолибденовой стали, используемой при производстве труб нефтяного сортамента, обладающих повышенной эксплуатационной надежностью. В процессе производства труб обнаружена проблема неоднородности механических свойств, что может привести к снижению эксплуатационных характеристик продукции. При отработке режимов термической обработки в лабораторных условиях этой проблемы не возникало.

Для оценки особенностей формирования структуры стали были использованы образцы двух типов: I – в исходном состоянии после стандартной термической обработки для данного типа труб (закалка в воду от 930 °С, отпуск 1,5 ч, при 690 °С) и II – после закалки в воду от 1120 °С. Для них проводили термическое циклирование по двум режимам: для I образцов режима скорость нагрева была 0,17 °С/с, для II режима выше – 4,04 °С/с (для сохранения количества углерода в твердом растворе) с последующими охлаждениями при различных скоростях (4,35 °С/с; 4,19 °С/с; 2,95 °С/с; 0,16 °С/с; 0,13 °С/с; 0,05 °С/с). При этом проводились измерения коэрцитивной силы и намагниченности насыщения образцов, которые позволяют судить, что при I режиме распад переохлажденного аустенита происходит по перлитной схеме (скорость охлаждения не влияет на полученный результат). При II варианте, распад происходит преимущественно по бейнитной схеме (причем с увеличением скорости охлаждения коэрцитивная сила возрастала). Это подтверждается результатами дилатометрического исследования кривых температурного коэффициента линейного расширения.

Наличие в исследуемой стали сильных карбидообразующих элементов – хрома, молибдена, и др. – оказывает существенное влияние на характер протекания фазовых превращений [1, 2]. Основная часть углерода переходит в специальные карбиды и не воздействует на формирование структуры при охлаждении. Температурный интервал растворения специальных карбидов смещается в область более высоких температур, вплоть до 1000–1050 °С.

При моделировании режимов термической обработки, регистрируемые изменения дилатометрических эффектов позволили оценить температурные интервалы и характер протекания как фазовых превращений, так и процессов выделения и растворения карбидных фаз. Полученная информация в сочетании с результатами измерений магнитных свойств позволяет отметить особенности формирования структуры исследуемой стали [2, 3]. Это дало возможность рекомендовать режимы термической обработки, с помощью которых можно зафиксировать повышенное содержание атомов внедрения в твердом растворе феррита, что позволит обеспечить более высокий уровень эксплуатационных свойств готового изделия.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что для фиксации повышенного содержания углерода в твердом растворе феррита необходима более высокая температура нагрева под закалку (до 950 °С), что должно обеспечить выделение преимущественно мелкодисперсных специальных карбидов и позволит получить необходимое сочетание механических и эксплуатационных свойств готового изделия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 20-08-00392.

Литература

1. Смирнов М. А., Счастливцев В. М., Журавлев Л. Г. Основы термической обработки стали : учеб. пособие. – М. : Наука и технологии, 2002. – 519 с.
2. Разработка коррозионно-стойких труб для сред, содержащих сероводород / И. Ю. Пышминцев, И. Н. Веселов, А. Г. Ширяев, Б. А. Ерехинский, В. И. Чернухин, А. Б. Арабей // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 7–8. – С. 62–70.
3. Смирнов М. А., Счастливцев В. М., Журавлев Л. Г. Основы термической обработки стали: Учебное пособие. М.: Наука и технологии, 2002. 519 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЯХ

Абабков Н. В.

*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
28, ул. Весенняя, г. Кемерово, 650000, Российская Федерация,
e-mail: n.ababkov@rambler.ru*

В работе представлены результаты анализа микроструктуры, механических и акустических характеристик металла теплоэнергетического оборудования после длительной эксплуатации, изготовленного из конструкционных сталей в зонах локализации пластической деформации. Исследовались образцы из сталей 20 и 12Х1МФ в исходном состоянии, а также после эксплуатации в течение 219 и 360 тыс. ч соответственно.

Установлены изменения структуры, механических и акустических характеристик исследованных материалов. По сравнению с исходным состоянием в стали 20 средний размер ферритных зерен увеличился в четыре и в два раза соответственно. Морфологические особенности состоят в том, что на фоне темной перлитной составляющей, окруженной сеткой из полиэдрических зерен феррита, хорошо видны иглы, видманштеттового феррита, расположенные внутри перлитных колоний параллельно друг другу. Доля видманштеттового феррита в структуре стали составила ~ 23 % от всего объема ферритной составляющей. Произошла трансформация диаграммы растяжения, на которой после эксплуатации отсутствует площадка текучести. Пластичность стали после эксплуатации уменьшилась в два раза, а прочность существенно не изменилась.

Микроструктура стали 12Х1МФ в исходном состоянии представляет собой феррито-перлитный агрегат. После эксплуатации структура стали 12Х1МФ претерпела существенные изменения: значительно уменьшилась доля перлитной составляющей и в два раза уменьшился средний размер перлитных колоний. Тенденция к уменьшению содержания перлита в разрушенном состоянии проявилась еще более ярко. Структура стали в этом состоянии представляет собой смесь феррита с небольшим содержанием карбидов.

Наибольшие изменения произошли в характере локализации деформации материала при одноосном растяжении. Методом DIC (digital image correlation) обнаружено, что на начальном этапе нагружения в эксплуатируемом металле не происходит формирования подвижных фронтов локализованной деформации, связанных с распространением полос Чернова–Людерса, зато задолго до появления видимой шейки разрушения появляется устойчивая зона локализации макродеформации. Положение такой зоны совпадает с местом, где в дальнейшем происходит разрушение. Похожая картина наблюдалась и для стали 12Х1МФ. Время появления устойчивой зоны локализации макродеформации коррелирует с общим временем растяжения образца до разрушения. Соотношение этих времен характеризует ресурс израсходованной пластичности материала до разрушения и может быть в перспективе использовано для разработки структурно-механического критерия локализованной деформации для диагностики состояния теплоэнергетического оборудования.

Показана возможность обнаружения зон локализованной деформации спектрально-акустическим методом контроля в конструкционных и теплоустойчивых сталях. Так, для всех исследованных образцов установлены значения таких параметров, как время задержки поверхностной акустической волны, коэффициент затухания и амплитуда принятого сигнала в зонах локализации деформации. Таким образом, спектрально-акустический метод контроля может применяться для обнаружения зон локализованной деформации в конструкционных и теплоустойчивых сталях.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук МК-1084.2020.8.

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПЛОТНОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

Богдан О. П., Муравьева О. В., Злобин Д. В., Тарасова А. В.

ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
д. 7, ул. Студенческая, г. Ижевск, 426096, Российская Федерация,
e-mail: pmkk@istu.ru

Изделия из терморасширенного графита (ТРГ) в связи с его уникальными свойствами (широким диапазоном рабочих температур, высокой химической стойкостью, высокими уплотняющей и теплоизоляционной способностями) находят все большее применение в различных отраслях промышленности (атомной, нефтегазовой, авиационной и др.). Использование ТРГ в опасных производственных объектах требует применения методов контроля его свойств (плотности, теплопроводности и т. п.) в процессе производства. Основными физическими параметрами заготовок из ТРГ являются плотность и неоднородность ее распределения по площади заготовки. Для контроля плотности заготовок из ТРГ могут быть использованы радиочастотный метод, обладающий небольшой чувствительностью, и радиационный – с использованием черенковского излучения, требующий специальных мер защиты. Поэтому возникает необходимость разработки новых более высокочувствительных и безопасных методов контроля заготовок из ТРГ.

В основе предлагаемого акустического метода контроля заготовок из ТРГ лежит амплитудно-теневой и временно-теневой методы прохождения с использованием воздуха в качестве переходной акустической среды.

В целях изучения чувствительности контроля заготовок из ТРГ акустическим теневым методом было проведено исследование параметров акустических волн (коэффициент прохождения, скорость), прошедших через объект в направлении толщины и ширины для 5 образцов матов ТРГ одинаковой толщины (10 мм) с различными значениями плотности. Возбуждение акустических импульсов при определении коэффициента прохождения осуществлялось специально разработанными акустическими воздушными преобразователями, обеспечивающими необходимый вид передаточной характеристики и уверенную фиксацию амплитуды прошедшего сигнала при прозвучивании объекта по толщине. Временной параметр, пропорциональный скорости волны измеряли с использованием низкочастотного (200 кГц) ультразвукового дефектоскопа при прозвучивании объекта по ширине. В таблице представлены результаты исследований акустических параметров матов-заготовок ТРГ различной плотности.

Акустические свойства матов-заготовок ТРГ различной плотности толщиной 10 мм

Акустические свойства	Средняя плотность ρ , кг/м ³				
	135	151	154	171	180
Коэффициент прохождения в центре образца D , %	2,3	2,1	2,0	1,9	1,8
Скорость звука C , м/с	1072±3	1152±2	1165±3	1169±3	1240±5

По результатам исследований можно сделать вывод об уверенной корреляции как коэффициента прохождения, так и скорости акустической волны с плотностью образцов (чувствительность к плотности по скорости составила $3,7 \text{ м}^4/\text{с}\cdot\text{кг}$, по коэффициенту прохождения – $10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$). Таким образом, исследования показывают возможность разработки высокочувствительных методик бесконтактного акустического контроля плотности матов и листов ТРГ и ее равномерности по площади, включая встраивание оборудования контроля в состав производственной линии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» в рамках научного проекта № ПАВ/20-90-17.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МОРОЗОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Любимова Н. Ю., Нуруллаев Э. М., Ермилов А. С., Герцен Т. А.

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

В настоящее время актуальной проблемой повышения эксплуатационного ресурса асфальта автомобильных дорог, а также для применения в качестве прокладок в оборудовании, изготовления автомобильных и авиационных шин, эксплуатируемых в условиях Арктики и Крайнего Севера России, является разработка и создание материалов с определенными деформационно-прочностными характеристиками.

Цель данной работы – анализ теоретических и экспериментальных исследований создания морозостойкого (с температурой стеклования ~ 170 К), эластичного (деформация не ниже 70 % при $T \sim 223$ К) полимерного композитного материала.

Представлены результаты теоретических исследований пластифицированного трехмерно сшитого эластомера на основе высокомолекулярного каучука полиизопрепдивинила; в качестве наполнителя использован полифракционный диоксид кремния. Теория разработана авторами с использованием упругого потенциала полимерной пространственной сетки в развитие феноменологического уравнения Муни–Ривлина [1], обобщенного в работах Трелоара [2]. Впервые показана зависимость коэффициентов уравнения от объемной доли полимера в связующем и учет концентрации химических поперечных связей. Рассмотрено структурно-механическое поведение эластомера в условиях одноосного растяжения. Предложенное уравнение зависимости механического напряжения от деформации и разработанные авторами компьютерные программы, позволили исследовать влияние ряда структурных параметров на механические характеристики изучаемого композита. Для сравнения механических характеристик композитов на основе низкомолекулярных и высокомолекулярных каучуков приведены огибающие точек разрыва по Т. Л. Смитсу [3, 4]. Показано, что разрывное напряжение материала покрытия на основе высокомолекулярных каучуков на порядок выше в сравнении с низкомолекулярными.

По результатам численных экспериментов [5] предложен оптимальный состав полимерного композитного материала, удовлетворяющий поставленной цели.

Экспериментальная проверка разработанной теории структурно-механического поведения эластомера выявляет удовлетворительное соответствие экспериментальных данных и расчетных характеристик (погрешность порядка 5 %).

Литература

1. Ермилов А. С., Нуруллаев Э. М. Разработка эластомеров, наполненных твердыми дисперсными компонентами с заданными механическими свойствами // Журнал прикладной химии. – 2011. – Т. 84 (9). – С. 1558–1561.
2. Treloar I. R. G. The Elasticity and related Properties of Rubbers // Rubber Reviews. – 1974. – Vol. 47 – P. 625–696.
3. Smith T. L. Limited Characteristics of crosslink Polymers // J. Appl. Phys. – 1964. – No. 35. – P. 27–32.
4. Smith T. L., Chy W. H. Ultimate Tensile Properties of Elastomers // J. Polymer Sci. – 1972. – Part A-2. – Vol. 10 (1). – P. 133–150.
5. Оптимизация состава трехмерно сшитого эластомера по энергии механического разрушения / Н. Ю. Любимова, А. С. Ермилов, Э. М. Нуруллаев, Е. А. Быкова // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 49. – С. 129–133.

VARIATION OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF CARBON/EPOXI FIBER LAMINATE AS A RESULT OF FATIGUE DAMAGE

Nikhamkin M. Sh.^{a)}, Solomonov D. G.^{b)}, Sazhenkov N. A.^{c)}

*Aircraft Engines Department, Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy Ave., Perm, 614000, Russian Federation,
e-mail: ^{a)}nikhamkin@mail.ru; ^{b)}solomonov1198@yandex.ru; ^{c)}sazhenkov_na@mail.ru*

Carbon/epoxi fiber laminates are increasingly used in critical structures of aircraft, ships, etc. Fatigue resistance is an important requirement for such structures. Material degradation due to the gradual accumulation of fatigue damage is accompanied by a decrease in stiffness. A decrease in stiffness during fatigue damage can result in a change in the natural frequencies of the structures. This effect has been repeatedly proposed to be used to predict the fatigue life of composite structures. The aim of this study is to obtain experimental data on the variation of the elastic characteristics of a carbon/epoxi fiber laminate as a result of progressive fatigue damage. As the studied characteristics of the laminate, four elasticity parameters of the monolayer are considered: Young's moduli E_1 and E_2 , shear modulus G_{12} , and Poisson's ratio ν_{12} .

The research technique consists of two stages. At the first stage, fatigue tests of samples are carried out, during which their modal characteristics are periodically determined. At the second stage, the obtained natural frequencies are used to determine the four elastic parameters mentioned.

Test specimens cut from laminate which are recommended by the ASTM standard D 3479 are used. Fatigue tests of the samples are carried out under cyclic tension while maintaining a constant amplitude and an average load value. The Zwick Amsler HFP 5100 electro resonance fatigue testing machine was used. The fatigue test of the sample was stopped several times to perform modal tests. The modal tests were carried out using scanning laser vibrometry [1] using a PSV-400-3D laser vibrometer. It provides the ability of determining a large number of natural frequencies and eigenmodes of the sample with high accuracy.

The determination of the above-mentioned four elastic parameters of the monolayer is considered in this study as the inverse identification problem using the results of modal tests [2, 3]. Identification is carried out by selecting the characteristics of elasticity, providing a minimum discrepancy between a set of calculated and experimental natural frequencies. The quasi-random search method was used to solve the optimization problem. The values of the natural frequencies calculated at each optimization step are the results of the finite element modal analysis of the samples.

The experimental modal analysis of the samples revealed 8 eigenmodes in the frequency range up to 5000 Hz. Five bending and three twisting eigenmodes are realized. All natural frequencies of the samples decreased with the accumulation of fatigue damage. Dependences of f_i/f_{i0} on n/N_f are obtained (f_i is the current value of the i -th natural frequency, f_{i0} is the initial value of the i -th natural frequency, n is the current number of load cycles and N_f is the number of cycles to failure). The obtained values of the natural frequencies at various values of n/N_f were used to obtain elasticity characteristics. As a result, the dependences of Young's moduli E_1 and E_2 , shear modulus G_{12} , and Poisson's ratio ν_{12} on n/N_f are found. The results can be useful in the development of material models describing the accumulation of fatigue damage and the life of structures.

References

1. Nikhamkin M. Sh., Bolotov B. Experimental and finite element analysis of natural modes and frequencies of hollow fan blades // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 467. – P. 306–311.
2. A mixed numerical/experimental technique for the nondestructive identification of the stiffness properties of fibre reinforced composite materials / H. Sol, H. Hua, J. De Visscher, J. Vantomme, W.P. De Wilde // *J. Independent Nondestructive Testing and Evaluation International*. – 1997. – Vol. 30 (2). – P. 85–91.
3. Nikhamkin M. Sh., Semenov S. V., Solomonov D. G. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering : Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. – Springer, Cham., 2019. – P. 487–497.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНКУРЕНТНОГО РОСТА КРИСТАЛЛОВ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО НАПЛАВЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ

Няшина Н. Д.^{а)}, Подседерцев А. Н.^{б)}, Кондратьев Н. С.^{в)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}nnyashina73@gmail.com; ^{б)}stevenmoore@yandex.ru; ^{в)}kondratevns@gmail.com*

В настоящее время все более широкое распространение получают аддитивные технологии послойного синтеза для изготовления конструкций из поликристаллических материалов. Поскольку рассматриваемая технология связана с многократным нагревом области формования изделия, то металл в процессе наращивания подвергается сложному температурному воздействию. Это приводит к многократному повторению фазовых переходов кристаллизации и полиморфных превращений. Полученная в результате зеренная структура определяет физико-механические характеристики материала и рабочие характеристики изделия. Для описания формирования микроструктуры и поведения готовых изделий при термомеханических воздействиях необходима разработка соответствующих конститутивных моделей. Наиболее эффективными являются модели, основанные на введении внутренних переменных, многоуровневого подхода и физических теориях, явным образом описывающих механизмы изменения состояния (в том числе структуры) материала на различных структурно-масштабных уровнях. В частности, для корректного рассмотрения указанных процессов необходима информация о структуре металла: форме, размерах, ориентации зерен и их границ.

В предлагаемой модели рассматривается геометрический подход к описанию формирования структуры металла в условиях конкурентного роста зерен при кристаллизации в процессе послойного наплавления проволоки. Ключевыми факторами, влияющими на формирование структуры при затвердевании, являются форма и размеры зоны расплава (кривизна границы зоны проплавления), градиент температуры и скорость охлаждения в зоне расплава, величина переохлаждения ниже температуры ликвидуса [1]. Можно отметить следующие особенности процесса затвердевания при прямом наплавлении: происходит гетерогенный рост кристаллов на уже затвердевших кристаллах или подложке, как следствие – нет значительного переохлаждения ниже температуры ликвидуса, необходимого для преодоления энергетического барьера при гомогенном затвердевании; имеет место конкурентный рост кристаллов: с наибольшей скоростью растут зерна, направление предпочтительного роста которых близко к направлению градиента температуры; направление теплоотвода зависит от кривизны границы зоны расплава.

В модели приняты следующие допущения: зерна изначально имеют форму куба со случайной по равномерному закону ориентированной кристаллографической системы координат; рост зерен при охлаждении расплава происходит строго в кристаллографических направлениях предпочтительного роста; скорость роста зерен пропорциональна проекции градиента температуры на направление ребра; при столкновении соседних зерен прекращается их рост в направлении соседнего зерна. Предварительные расчеты показали, что модель позволяет отобразить характерную особенность роста кристаллов: зависимость скорости роста от ориентации кристалла относительно направления градиента температуры и, как следствие, преобладание зерен, направление предпочтительного роста которых близко к направлению теплоотвода [2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70027.

Литература

1. Toward an integrated computational system for describing the additive manufacturing process for metallic materials / R. Martukanitz, P. Michaleris, T. Palmer, T. DebRoy, Z.-K. Liu, R. Otise, T.W. Heo, L.-Q. Chen // Additive Manufacturing. – 2014. – Vols. 1–4. – P. 52–63.
2. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОТОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Семенов С. В., Нихамкин М. Ш., Саженков Н. А., Балакирев А. А.

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

Для диагностики опасных вибрационных режимов роторных систем широко используется моделирование их динамического поведения с помощью метода конечных элементов. При моделировании сложных систем, таких как, например, газотурбинные двигатели, возникают трудности, обусловленные характерными особенностями этих систем. Эти особенности связаны со стремлением к снижению массы двигателей и проявляются в снижении жесткости валов и дисков, появлении анизотропии жесткости корпусных деталей, сложных пространственных форм колебаний [1]. Все это ведет к усложнению их вибрационного поведения и увеличению количества резонансов в спектре, что в свою очередь затрудняет понимание механизмов процессов, требующих диагностического выявления.

Создание адекватной математической модели роторной системы позволяет лучше понять механизм ее вибрационного поведения и отработать методику диагностики того или иного явления. Повышение точности математической модели может достигаться за счет идентификации ее элементов по модальным характеристикам [2].

В работе представлен возможный метод идентификации модели роторной системы, основанный на использовании экспериментального модального анализа с помощью трехкомпонентной лазерной виброметрии. Процедура идентификации заключалась в сравнении собственных частот и форм элементов роторной системы в условиях свободного подвеса, полученных с помощью экспериментального и расчетного модального анализа, и решения обратной задачи по определению эффективных величин модуля упругости и плотности данных элементов. Сравнение частот осуществлялось при одних и тех же граничных условиях. Качество идентификации оценивалось по МАС-критерию.

Демонстрация метода осуществлялась на экспериментальной модельной двухдисковой роторной установке. Особенностью установки является наличие собственных форм колебаний дисков в рабочем диапазоне частот вращения. Исследования показали, как повышение точности математических моделей отдельных узлов роторной системы за счет их экспериментальной идентификации по модальным характеристикам позволяет улучшить воспроизведение вибрационного поведения в модели всей роторной системы и упростить процесс создания методик диагностики опасных вибрационных явлений.

Литература

1. Experimental investigation of rotor dynamics in aircraft engine with two-axis stiffness anisotropy of supports / S. V. Semenov, M. S. Nikhamkin, O. V. Korepanova, Y. A. Berendorf // ICAS 2014, St. Petersburg, Russia, September 7–12, 2014 : Proceedings 29th of the Congress The International Council of the Aeronautical Sciences. – St. Petersburg : International Council of the Aeronautical Sciences, 2014.
2. Simulation of Rotor System Vibrations Using Experimentally Verified Super Elements / S. Semenov, M. Nikhamkin, N. Sazhenkov, I. Semenova, G. Mekhonoshin // ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2016), Phoenix, Arizona, USA November 11–17, 2016 : Proc. – New York: ASME, 2017. – Mechanics of Solids, Structures and Fluids; NDE, Diagnosis, and Prognosis : ASME. Vol. 9.

A COMPUTATIONAL STUDY OF MIXED MODE CRACK GROWTH: MOLECULAR DYNAMICS METHOD

Stepanova L. V., Belova O. N.

*Department of Mathematical Modelling in Mechanics, Samara National Research University,
34, Moskovskoe Hwy., 443086, Samara, Russian Federation*

A comprehensive study of the influence of geometric characteristics (model dimensions, crack length), temperature, strain rate and loading mixing parameter on the plate strength, crack growth and crack propagation direction angle was carried out. The material selected for this study is aluminum. The crack propagation direction angles of a central crack in an aluminum plate under mixed mode loading are determined using the molecular dynamics method realized in LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator). Atomistic modeling of mixed-mode loadings of the plane medium with the central crack allowed us to find all the crack propagation direction angles in the full range of the mixed mode loadings. For this purpose, an embedded atom potential (EAM) available in LAMMPS molecular dynamics (MD) software is utilized to accurately pinpoint mixed-mode crack growth. The results of simulations are shown in fig. 1.

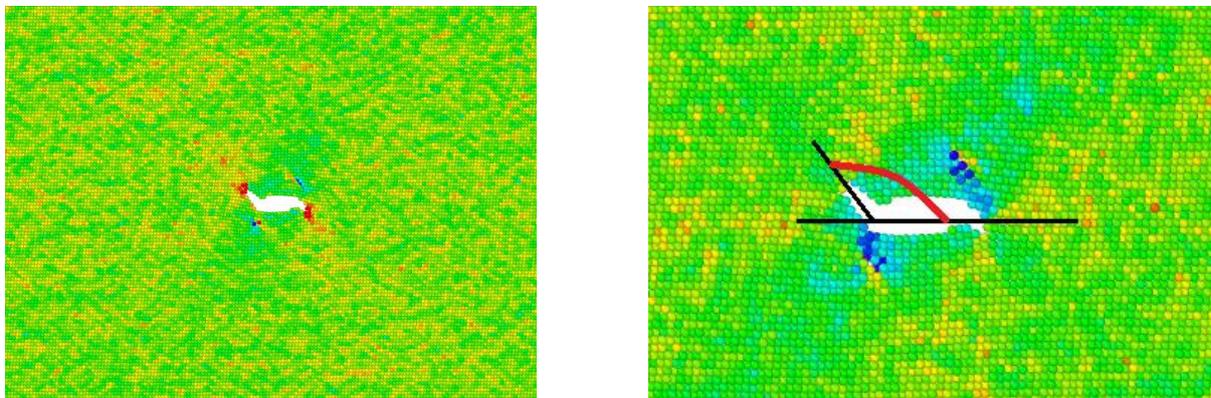


Fig. 1. Cracked plate under mixed mode loading: stress tensor component σ_{22} (left) and determination of crack propagation direction angle (right)

This paper investigates the results of brittle fracture in cracked plates subjected to the mixed mode I/II loading using different fracture criteria. Along with MD simulations, the generalized fracture criteria of conventional fracture mechanics are used. The generalized maximum tangential stress criterion, generalized maximum strain and generalized minimum strain energy density are discussed. Using all these criteria, the crack propagation direction angles are obtained in the full range of mixed mode loading. The generalized criteria considered the effect of higher order terms on singular terms was considered in order to improve the predictions.

It is shown that the results predicted with the use of the modified criteria are in significantly better agreement with the MD results compared with the conventional minimum strain energy density criterion.

Financial support from the Russian Foundation of Basic Research (project No. 19-01-00631) is gratefully acknowledged.

References

1. Stepanova L., Belova O. Estimation of crack propagation direction angle under mixed mode loading in linear elastic isotropic materials by generalized fracture mechanics criteria and by molecular dynamics method // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096. – P. 012060.

2. Stepanova L., Bronnikov S. Mathematical modeling of the crack growth in linear elastic isotropic materials by conventional fracture mechanics approaches and by molecular dynamics method: crack propagation direction angle under mixed mode loading // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 973. – P. 012046.
3. Stepanova L. V., Bronnikov S. A., Belova O. N. Estimation of crack propagation direction angle under mixed-mode loading (mode I and mode II): generalized fracture mechanics criteria and atomistic modeling (molecular dynamics method) // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2017. – No. 4. – P. 189–213.

PERTURBATION METHODS IN NONLINEAR FRACTURE MECHANICS: STATE-OF-THE-ART FACILITIES AND RESULTS

Stepanova L. V., Mironova E. A., Peksheva A. A.

*Samara University,
34, Moskovskoe Hwy., Samara, 443086, Russian Federation,
e-mail: StepanovaLV2015@yandex.ru*

Perturbation theory techniques and their applications in nonlinear fracture mechanics are discussed. This study summarizes an overview of the asymptotic state of the art on the fracture behavior of nonlinear and damaged materials. The asymptotic stress, strain and damage fields near the crack tip for power-law materials and the influence of the damage accumulation processes on the stress-strain state in the vicinity of the crack tip are analyzed. The study gives a detailed review of the fundamental results obtained in nonlinear fracture mechanics by means of asymptotic methods and perturbation theory approaches [1, 2]. The main attention is paid to power-law materials and asymptotic stress and strain fields in the vicinity of the crack in both non-damaged materials and damaged materials under mixed mode loadings. The paper analyzes the development of the asymptotic elastic-plastic crack-tip fields derived by Hutchinson, Rice and Rosengren as a singular dominant term of the asymptotic expansion for the stress field in a power-law hardening material and shows the current state of the asymptotic methods and their applications in nonlinear fracture mechanics and continuum damage mechanics.

Recent activity is surveyed in the analysis of crack-tip stress and strain fields for stationary and growing cracks in power-law materials. Some of the main subjects to further progress are discussed. In the study, the detailed review of solutions for crack problems obtained for power law constitutive equations is presented. In nonlinear fracture mechanics, one often needs to solve nonlinear differential equations about eigenfunction and eigenvalue. Many nonlinear eigenvalue problems have multiple solutions. However, it is well known that multiple solutions of nonlinear boundary value problems are not easy to gain by means of numerical techniques, such as the shooting method.

The perturbation and asymptotic approximations of nonlinear problems often break down as nonlinearity becomes strong. Therefore, they are only valid for weakly nonlinear ordinary differential equations and partial differential equations in general. The homotopy analysis method (HAM) is an analytic approximation method for highly nonlinear problems. Unlike perturbation techniques, the HAM is independent of any small/large physical parameters at all. Besides, different from all the other analytic techniques, the HAM provides us a convenient way to guarantee the convergence of solution series so that it is valid even if nonlinearity becomes rather strong. Thus, in fracture mechanics HAM may play a significant role in solving nonlinear eigenvalue problems. The great potential and validity of the for highly nonlinear eigenvalue equations with multiple solutions and singularity can be used for obtaining analytical solutions in fracture mechanics. The homotopy analysis method will provide us one of the promising approach for nonlinear eigenvalue problem arising in fracture mechanics. The present review shows that asymptotic solutions of fracture mechanics problem will be connected with derivation of multi-term asymptotic series expansions for the crack-tip fields using effective computer algorithms and procedures. The further development of continuum damage mechanics will probably be connected with experimental determination of active damage accumulation zone in the vicinity of the crack tip via interference-optic methods, tomographic scanning techniques and acoustic emission methods.

References

1. Stepanova L. V., Yakovleva E. M. Asymptotic stress field in the vicinity of a mixed-mode crack under plane stress conditions for a power-law hardening material // *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 10 (3). – P. 367–393.
2. Carpinteri A., Paggi M. Asymptotic analysis in Linear Elasticity: From the pioneering studies by Wieghardt and Irwin until today // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2009. – Vol. 76. – P. 1771–1784.

QUASILINEARIZATION METHOD FOR ANALYTICAL SOLUTIONS TO NONLINEAR PROBLEMS OF SOLID MECHANICS: A PLATE WITH CENTRAL CIRCULAR HOLE UNDER CREEP REGIME

Stepanova L. V., Zhabbarov R. M.

*Samara University,
34, Moskovskoe Hwy., Samara, 443086, Russian Federation,
e-mail: stepanova.lv@ssau.ru*

Modern computer technologies and algorithms provide fast and accurate numerical solutions of complex systems of ordinary differential equations. Nevertheless, the problem of constructing analytical approximate solutions of nonlinear problems becomes even more urgent at the present time [1–3]. Apparently, a reasonable combination of computer technologies and approximate solutions or reductions of nonlinear systems of differential equations gives a promising way of studying physical, economic, biological problems and other problems of natural science. Therein the quasilinearization method is a promising approach, in the framework of which the solution is constructed through skillful combinations of linear approximation methods and the use of possibilities of modern computing systems.

In this study, the approximation solution to the problem for an infinite plate with the circular hole under creep regime is obtained by the quasilinearization method. The power creep law (Norton’s law) is used:

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{f(\sigma_e)}{\sigma_e} \left(\sigma_r - \frac{1}{2} \sigma_\theta \right) = \frac{3}{2} \sigma_e^{n-1} \left(\sigma_r - \frac{1}{2} \sigma_\theta \right) = F_r(\sigma_r, \sigma_\theta), \quad \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{f(\sigma_e)}{\sigma_e} \left(\sigma_\theta - \frac{1}{2} \sigma_r \right) = \frac{3}{2} \sigma_e^{n-1} \left(\sigma_\theta - \frac{1}{2} \sigma_r \right) = F_\theta(\sigma_r, \sigma_\theta).$$

Four approximations of the solution of the nonlinear problems are found and shown in Figure 1. It is shown that with the increasing number of approximations the solution converges to the limit numerical solution. It is worth to note that the tangential stress reaches its maximum value not at the circular hole but at the internal point of the plate. It is also shown that the quasilinearization method is the effective method for nonlinear problems.

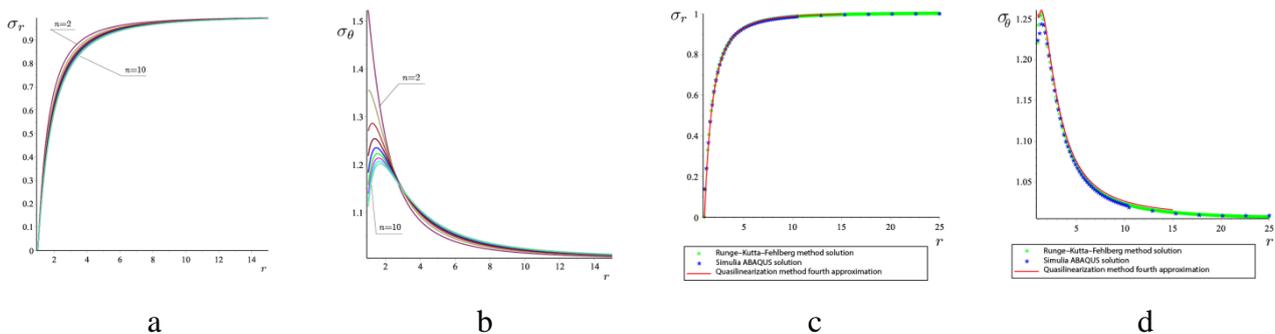


Fig. 1. Stress tensor components σ_r and σ_θ for different values of the creep exponent n (approximate solution) (a, b) and comparison of the approximate solutions obtained with finite FEM stress distribution (c, d)

Financial support from the Russian Foundation of Basic Research (project No. 19-31-90100) is gratefully acknowledged.

References

1. Polyanin A. D. Construction of exact solutions in implicit form for pdes: new functional separable solutions of nonlinear reaction-diffusion equations with variable coefficients // International Journal of Non-linear Mechanics. – 2019. – Vol. 111. – P. 95–105.

2. Kudryashov N. A. Methods of nonlinear mathematical physics. – Dolgoprudny : Intellekt, 2010. – 368 p. (In Russian).
3. Andrianov I., Avreytsevich Ya. Methods of asymptotic analysis and synthesis. – 2013. – 276 p. (In Russian).
4. Stepanova L. V. Mathematical methods of fracture mechanics. – Moscow : Fizmatlit, 2009. – 336 p. (In Russian).
5. Stepanova L. V., Zhabbarov R. M. Quasilinearization method for the solution to the problem of plate with the central circular hole under creep regime // Vestnik Samarskogo Universiteta. 2017. V. 23. № 2. P. 44–50.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ, Т-НАПРЯЖЕНИЙ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЫСШИХ ПРИБЛИЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ С ДВУМЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ И НАКЛОННЫМИ ТРЕЩИНАМИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ РЕШЕНИЕ

Степанова Л. В., Долгих В. С.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
34, Московское шоссе, Самара, 443086, Российская Федерация,
e-mail: StepanovaLV2015@yandex.ru*

В работе представлены результаты экспериментального и вычислительного исследования напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в изотропном линейно-упругом материале в условиях смешанного нагружения. Цель проведенного исследования – определение параметров механики разрушения для большой серии образцов со взаимодействующими трещинами в условиях отрыва и смешанного нагружения и вычисление не только коэффициентов интенсивностей напряжений (КИН) и Т-напряжений, но и коэффициентов высших приближений в многопараметрическом асимптотическом разложении поля напряжений М. Уильямса:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \sum_{m=1}^{m=2} \sum_{k=0}^{\infty} a_k^m r^{(k-1)/2} f_{m,ij}^{(k)}(\theta).$$

Экспериментальные образцы представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1 (а–г) и 2 показаны картины изохроматических полос в исследованных образцах различных конфигураций и при различных системах нагружения.

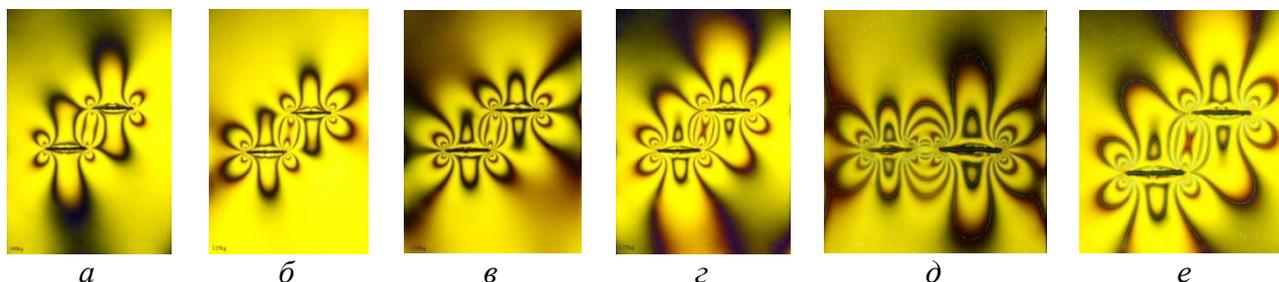


Рис. 1. Картины изохроматических полос в образце с двумя параллельными трещинами

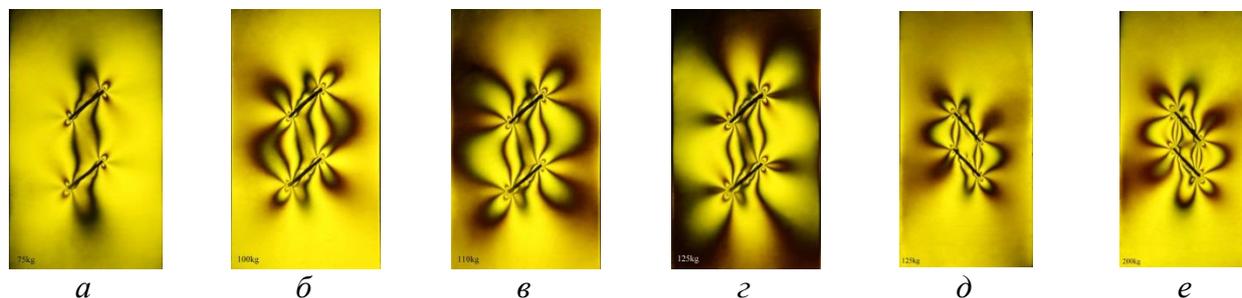


Рис. 2. Картины изохроматических полос в образце с двумя наклонными трещинами

В работе с помощью метода цифровой фотоупругости [1–3] и конечно-элементного анализа вычислены КИН, Т-напряжения и коэффициенты высших приближений в асимптотическом разложении М. Уильямса. Показано, что метод цифровой фотоупругости, в рамках которого в пакете Matlab (рис. 1 д, е) определяются самые темные точки изохроматических полос (рис. 1 и 2), является эффективным методом вычисления параметров a_k^m . Определен-

ные экспериментальные значения КИН сопоставлены с результатами конечно-элементных расчетов. Экспериментальные и численные значения, хорошо согласуются между собой.

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (проект 19-01-00631).

Литература

1. Степанова Л. В., Долгих В. С. Цифровая обработка результатов оптоэлектронных измерений. Метод фотоупругости и его применение для определения коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса поля напряжений // Вестник Самарского технического университета. Серия «Физико-математические науки». – 2017. – Т. 21 (4). – С. 717–735.
2. Dolgikh V. S., Stepanova L. V. A photoelastic and numeric study of the stress field in the vicinity of two interacting cracks: Stress intensity factors, T-stresses and higher order terms // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2216. – P. 020014.
3. Stepanova L. V. The algorithm for the determination of the Williams asymptotic expansion coefficients for notched semidisks using the photoelasticity method and finite element method // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2216. – P. 020013.

ВЕГЕТАТИВНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ПЕЙСМЕКЕРНОЙ АКТИВНОСТИ СИНОАТРИАЛЬНОГО УЗЛА ПРИ ХОБЛ В ПЕРИОДЫ ОБОСТРЕНИЯ И РЕМИССИИ

Милащенко А. И., Андреев А. Н., Миронов В. А., Попов А. А.

ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России, 3, ул. Репина, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: 89827097753@yandex.ru

Хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) является социально-значимым заболеванием. Оценка состояния вегетативной системы, способной быстро изменять функции соматических органов, важна при различных заболеваниях, поскольку вегетативная система вовлекается в патологический процесс на самых ранних стадиях. Важным инструментом оценки дисфункции вегетативной нервной системы является измерение вариабельности сердечного ритма (ВСР). Показатели ВСР имеют прогностическое значение у пациентов с ХОБЛ, так как повышенная вегетативная активность является предиктором обострения ХОБЛ. В то же время доказано, что ВСР, определенная по 24-часовому мониторингу, имеет много факторов, способствующих неточности измерения (изменения дыхания, положения тела) в течение суток. Таким образом, оценка вариабельности сердечного ритма использованием метода высокоразрешающей ритмокардиографии (РКГ), лишенная вышеназванных недостатков может оказаться наиболее перспективным методом выявления нарушений регуляции пейсмекерной активности синоатриального узла сердца.

Цель исследования – оценить возможность достоверного выявления влияния ХОБЛ на вариабельность ритма сердца, определенной методом ритмокардиографии высокого разрешения.

Материалы и методы исследования. В исследование были включены 93 пациента мужского пола 45–74 лет с ХОБЛ и 42 пациента мужского пола группы сравнения, статистически не отличающихся от основной группы по сопутствующей патологии и возрасту ($p = 0,267$). Мы исключали пациентов с какими-либо заболеваниями легких и ЛОР-органов, а также с тяжелыми соматическими заболеваниями, способными исказить РКГ-данные (перенесенный ранее инфаркт миокарда, артериальная гипертензия любой степени, стенокардия напряжения высоких функциональных классов и т.д.). В дополнение к стандартным методам диагностики пациентам обеих групп было проведено исследование вариабельности ритма сердца с помощью аппаратно-программного комплекса КАП-РК-02-«МИКОР» в покое и при разнонаправленных вегетативных стимулах.

Результаты. При ХОБЛ наблюдается изменение соотношения факторов, влияющих на пейсмекерную активность синоатриального узла. Значительно снижен вклад парасимпатического влияния, который в норме является преобладающим. Гуморально-метаболические волны являются преобладающим фактором, воздействующим на синоатриальный узел. Построено решающее правило, позволяющее отличить пациентов основной группы и группы сравнения:

Интегративный прогностический индекс = $0,04 + (401,67 * SDNN_{\text{в покое}}) + (-636,91 * \bar{b}1_{\text{в покое}}) + (0,22 * trsek_{\text{в пробе Вальсальвы}}) + (528,48 * \bar{b}m_{\text{в пробе Ашнера}}) + (-0,18 * VLF_{\text{в пробе Ашнера}}) + (-0,28 * LF_{\text{в пробе Ашнера}}) + (-183,07 * SDNN_{\text{в аортостатической пробе}}) + (207,43 * \bar{b}m_{\text{в аортостатической пробе}}) + (10,10 * \bar{b}s_{\text{в аортостатической пробе}}) + (7,66 * daNNsek_{\text{в аортостатической пробе}})$

Если рассчитанный по прогностическому правилу результат будет укладываться в числовой промежуток меньше нуля, то у пациента прогнозируется наличие ХОБЛ с вероятностью

$P_0 = \frac{e^{-z}}{1 + e^{-z}}$; если больше нуля, то у пациента прогнозируется наличие ХОБЛ

с вероятностью $P_0 = \frac{1}{1 + e^{-z}}$.

Выводы. У пациентов с ХОБЛ происходит значимое изменение вариабельности ритма сердца, вероятно, патогенетически связанное с патологическими процессами, происходящими при ХОБЛ. Построено решающее правило, позволяющее отличить пациентов с ХОБЛ от пациентов группы сравнения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ ДО МОМЕНТА ВРЕМЕНИ НАЧАЛА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

Назаров В. В.¹, Лепешкин А. Р.²

¹*Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова,
1, Мичуринский проспект, Москва, 119192, Российская Федерация,
e-mail: intec130@mail.ru*

²*Московский авиационный институт (НИИ),
4, Волоколамское шоссе, Москва, 125993, Российская Федерация,
e-mail: lepeshkin.ar@gmail.com*

Предложена модель, в которой процесс ползучести разграничен во времени двумя последовательными стадиями. Для разграничения этих стадий предложен критерий (на диаграмме кривой ползучести средний угол наклона касательной к оси абсцисс) начала изменения формы деформируемого твердого тела (или появления шейки при одноосном растяжении). Из предложенного критерия следует момент времени начала формоизменения. В качестве уравнения механического состояния принимается степенная зависимость между скоростью деформации и напряжением, по которой возможна аппроксимация экспериментальной кривой ползучести. Проверка предложенной модели показала удовлетворительное совпадение с экспериментальными кривыми ползучести титанового сплава ВТ5 при 650 °С.

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ЭКВИВАЛЕНТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Назаров В. В.¹, Лепешкин А. Р.²

¹*Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
1, Мичуринский проспект, Москва, 119192, Российская Федерация,
e-mail: inmec130@mail.ru*

²*Московский авиационный институт (НИИ),
4, Волоколамское шоссе, Москва, 125993, Российская Федерация,
e-mail: lepeshkin.ar@gmail.com*

Рассмотрены три базовых и два усложненных параметром эквивалентных напряжений. Базовыми эквивалентными напряжениями являются максимальное нормальное напряжение, эквивалентное напряжение Мизеса и удвоенное максимальное касательное напряжение. Чтобы определить влияние каждого базового эквивалентного напряжения на время в момент разрушения рассмотрены две их линейные комбинации с одним материальным параметром. Одна из них – комбинация максимального нормального напряжения и эквивалентного напряжения Мизеса (предложена Лебедевым А.А., 1965). Другая из них – комбинация максимального нормального напряжения и удвоенного максимального касательного напряжения (предложена Назаровым В.В., 2019). Чтобы определить, какой вариант эквивалентного напряжения лучше описывает процесс длительной прочности, а также установить влияние каждого базового эквивалентного напряжения на время в момент разрушения при сложном напряженном состоянии, анализу были подвергнуты результаты длительных испытаний трубчатых образцов под действием осевой силы и крутящего момента. Неизвестные параметры вычислялись методом нахождения экстремумов через меню поиск решения (Microsoft Office Excel), где в качестве целевого условия принимался минимум погрешности. Из анализа погрешностей суммарного расхождения опытных данных относительно аппроксимации в виде степенной зависимости между временем в момент разрушения и номинальным эквивалентным напряжением установлено, что линейная комбинация максимального нормального напряжения и удвоенного максимального касательного напряжения во всех рассмотренных случаях наилучшим образом позволяет аппроксимировать процесс длительной прочности. Из анализа значений материальных параметров в усложненных эквивалентных напряжениях не получается обобщить влияние каждого максимального напряжения на все рассмотренные серии длительных испытаний.

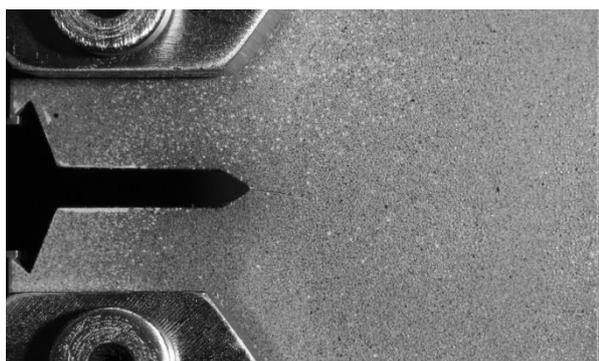
АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА В МЕТОДЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Титков В. В., Панин С. В.

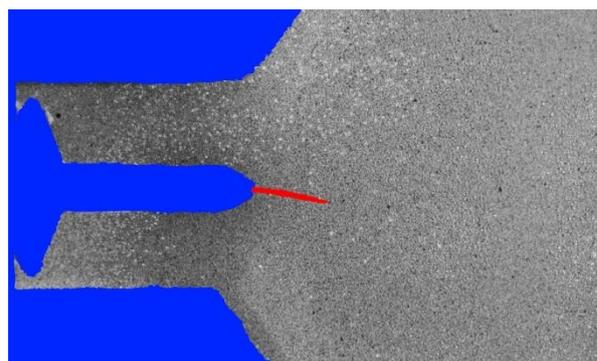
*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, просп. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: titkov.vladimir@gmail.com*

В задаче оценки деформации методом корреляции цифровых изображений [1, 2] ошибки при построении векторов перемещений, как правило, обусловлены резким изменением отражательной способности участка поверхности либо условий освещенности, наличием трещин на изображении, шумами матрицы фоточувствительного элемента, помехами оптического тракта и др. При этом появление ошибочно определенных векторов перемещений носит случайный характер. Решение указанной проблемы может быть получено несколькими способами, в частности при использовании сложных алгоритмов построения векторных полей [3, 4] и с привлечением методов их фильтрации [5]. Также при обработке экспериментальных данных наличие на изображениях областей без материала (захватов, пропилов, мест трещин и т. д.) и других артефактов вызывает ошибки в определении перемещения, что в свою очередь обуславливает появление ошибок в оценке деформации и в определении параметров состояния материала, например КИН, СТOD, J-интеграл [6]. Данная проблема может быть решена ручной разметкой изображений (маски) на зоны (без материала, с материалом, трещины и т. п.). Однако экспериментальные серии могут составлять более чем 500 изображений, при этом установка единой маски для всех пар изображений чаще всего дает плохой результат из-за смещения образца в захватах испытательной машины.

Для решения задачи автоматического построения маски с выделением областей с материалом, без материала и трещины предлагается алгоритм, который комбинирует алгоритмы обработки изображений (заливка областей по порогу, поиск границ) с алгоритмами поиска трещин на изображениях. Комбинированный алгоритм разделяется на следующие базовые шаги: разбиение изображения сеткой; выделение основного паттерна изображения и выделение границ в каждой ячейке; применение алгоритмов п. 1 к полям перемещений и деформаций; поиск трещин по изображениям и полям перемещений и деформаций.



a



б

Изображение поверхности материала (*a*). Маска с размеченными областями (*б*) трещины (красный) и отсутствия материала (синий)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-00087)

Литература

1. Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision / Michael A. Sutton, Stephen R. McNeill, Jeffrey D. Helm, Yuh J. Chao // Photomechanics. – Springer Berlin Heidelberg, 2000. – P. 323–372.
2. Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. – Springer, 2009. – 321 p.
3. Панин С. В., Любутин П. С. Верификация метода оценки деформации на мезоуровне, основанного на построении полей векторов перемещений участков поверхности // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8 (2). – С. 69–80.
4. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis / M. A. Sutton, M. Q. Cheng, W. H. Peters et al. // Image and vision computing. – 1986. – Vol. 4 (3). – P. 143–151.
5. Воскобойников Ю. Е., Белявцев В. Г. Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // Автометрия. – 1999. – Т. 35 (5). – С. 97–105.
6. Cherepanov G. P. Crack propagation in continuous media // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 1967. – Vol. 31 (3). – P. 503–512.

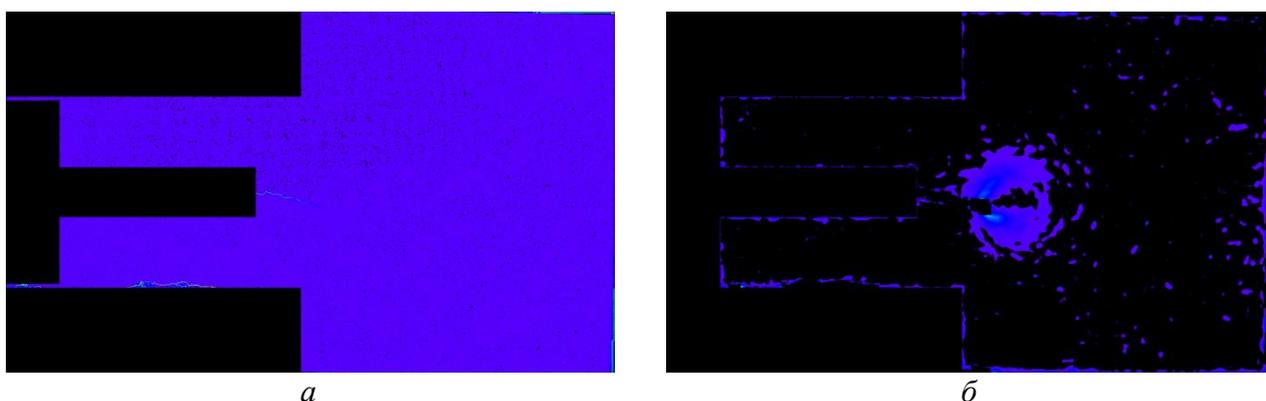
ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ J-ИНТЕГРАЛА МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Титков В. В., Панин С. В.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, просп. Академический, Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: titkov.vladimir@gmail.com*

С применением метода корреляции цифровых изображений (DIC) [1, 2] по полноразмерным полям смещений/деформаций на поверхности объекта становится возможным определение параметров состояния материала, например таких как, КИН, СТOD, J-интеграл. Предложенный Райсом в 1968 г J-интеграл. [3], определяется как независимый от пути линейный интеграл, который характеризует напряжения и деформации наконечника трещины под действием упругих и / или эластопластических материалов. Согласно определению, J-интеграл является независимым от пути интегрирования, и это свойство соблюдается при работе с модельными данными [4]. Однако в реальном эксперименте за счет ошибок в определении смещений, получаемых методом корреляции цифровых изображений, его независимость от пути интегрирования не выполняется [5]. Как для способа измерения, точность имеет критическое значение для метода DIC, так неопределенность решения задачи выбора контура интегрирования вызвана зашумленностью первичных данных и ошибками определения полей методов DIC [6].

Алгоритм определения допустимых отклонений перемещений [7] для учета ошибок расчета векторов перемещений, влияющих на измерения деформации на поверхности нагруженных материалов методом корреляции цифровых изображений, заключается в определении минимальных и максимальных отклонений величины рассчитываемого вектора перемещений по величине производной векторного поля в заданном окне (рисунок). Применение данного алгоритма позволяет исключать из дальнейших расчетов перемещения превышающие рассчитанные интервалы или маркировать их и применять к ним алгоритмы коррекции (фильтрации, сглаживания и т. п.).



Поле зоны пластики до (*a*) и после (*б*) постобработки

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-00087).

Литература

1. Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision / Michael A. Sutton, Stephen R. McNeill, Jeffrey D. Helm, Yuh J. Chao // Photomechanics. – Springer Berlin Heidelberg, 2000. – P. 323–372.

2. Sutton M. A., Orteu J.-J., Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. – Springer, 2009. – 321 p.
3. Cherepanov G. P. Crack propagation in continuous media // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 1967. – Vol. 31 (3). – P. 503–512.
4. Algorithm for J-integral Measurement by Digital Image Correlation Method / V. V. Titkov, S. V. Panin, A. V. Eremin, A. A. Kozulin, P. S. Lyubutin // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2051. – 020305.
5. Tracy J., Waas A., Daly S. Experimental assessment of toughness in ceramic matrix composites using the J-integral with digital image correlation: Part I: methodology and validation // Journal of Materials Science. – 2015. – Vol. 50 (13). – P. 4646–4658.
6. Wang Y., P. Lava, P. Reu, D. Debruyne. Theoretical Analysis on the Measurement Errors of Local 2D DIC: Part I: Temporal and Spatial Uncertainty Quantification of Displacement Measurements // Strain. – 2016. – Vol. 52 (2). – P. 110–128.
7. Алгоритм определения допустимых отклонений перемещений при оценке деформации материалов методом корреляции цифровых изображений / В. В. Титков, С. В. Панин, А. В. Еремин, П. С. Любутин // Международный междисциплинарный симпозиум «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций». – 2019. – С. 241–242.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ШТАМПА С ПОРИСТОЙ ПОЛУПЛОСКОСТЬЮ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫМИ СВОЙСТВАМИ В РАМКАХ МОДЕЛИ БИО С ПОВЕРХНОСТНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Данильченко С. А., Колосова Е. М., Наседкин А. В., Наседкина А. А.

*Институт математики, механики и компьютерных наук, Южный федеральный университет,
8 а, ул. Мильчакова, 344090, Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
e-mail: nasedkin@math.sfedu.ru*

В последнее время для исследования свойств материалов активно применяются методы микро- и наноиндентирования. Эти методы позволяют изучать механические свойства на микро- и наноуровне, получать значения микротвердости, модуля упругости и др.

В работе при моделировании процессов наноиндентирования были изучены плоские задачи о контакте твердого индентора параболической формы с деформируемой полуплоскостью с неоднородными по глубине материальными свойствами, рассмотрен пороупругий материал полуплоскости по модели Био и учета поверхностных напряжений при наноразмерности задачи по модели Гуртина–Мурдоха, причем масштабный фактор связывается с размерами зоны контакта.

Поставленные задачи решаются численно по методу конечных элементов для дальнейшего сопоставления результатов с численно-аналитическими решениями и с экспериментальными результатами по индентированию пороупругих материалов, полученных в Институте механики Болгарской Академии Наук. Отметим, что учет поверхностных напряжений осуществляется опционально только для моделирования наноразмерных эффектов в области контакта.

В качестве программного инструментария при конечно-элементном моделировании использовался вычислительный комплекс ANSYS. Были разработаны программы на макроязыке APDL ANSYS, позволяющие решать рассматриваемые задачи при различных значениях геометрических и физических входных параметров.

Для использования поверхностных элементов с подходящими свойствами применялась аналогия между задачами пороупругости и термоупругости, согласно которой задачи пороупругости решались как соответствующие термоупругие задачи с плоскими и поверхностными элементами. Построение геометрических моделей осуществлялось с использованием технологии моделирования «снизу-вверх». В соответствии с методологией решения контактных задач при построении сетки конечных элементов обеспечивалось сгущение разбиения вблизи зоны контакта. Для этого были дополнительно выделены геометрические подобласти, для которых задавалась регулярная конечно-элементная сетка меньшего размера по сравнению с остальной областью. При наноразмерном контакте предварительно осуществлялся переход к безразмерной постановке. Далее для учета поверхностных напряжений дополнительно на поверхности полуплоскости определялись оболочечные элементы с опциями мембранных напряжений. Учет функционально-градиентных свойств по глубине полуплоскости осуществлялся заданием различных материальных констант в зависимости от значений центральных точек плоских конечных элементов.

На основе построенных конечно-элементных моделей в результате численного решения контактных задач для различных пороупругих материалов, законов неоднородностей и поверхностных модулей полуплоскости в ANSYS были проведены расчеты распределений нормальных напряжений в области контакта, осадки индентора, размера области контакта, интенсивности напряжений или эквивалентных напряжений по Мизесу и порового давления.

Разработанная технология может быть применена также для исследования осесимметричных контактных пороупругих задач с поверхностными напряжениями при других формах инденторов, а также для многослойного полупространства и слоя.

Работа выполнена в рамках международного проекта РФФИ и Национальным научным фондом Болгарии № 19-58-18011.

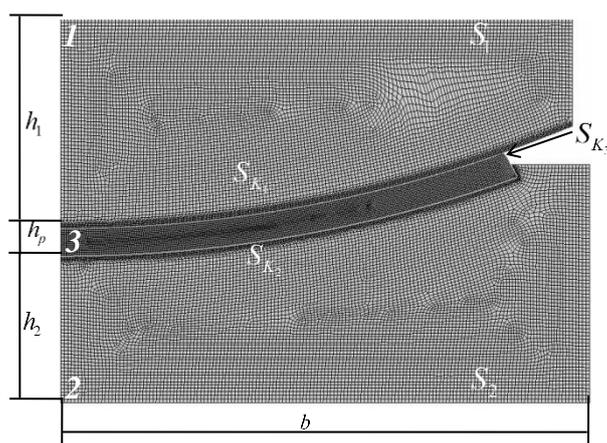
КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СФЕРИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТОВ ЧЕРЕЗ АНТИФРИКЦИОННУЮ ПРОСЛОЙКУ

Каменских А. А., Панькова А. П.

ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, Российская Федерация,
e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

В работе рассмотрено влияние свойств материалов антифрикционной прослойки и ее толщины на деформационное поведение сферических опорных частей пролетных строений мостов в целом и параметры зон контакта в частности (рисунок). Граничные условия: на S_1 действует постоянная сила индентирования 1000 кН и запрещен изгиб, на S_2 запрещены перемещения по координате y .

В рамках серии натуральных экспериментов, проведенных д.ф.-м.н. А.А. Адамовым в Институте механики сплошных сред Уральского отделения РАН (Пермь, Россия), в качестве материалов относительно тонкого слоя скольжения сферических опорных частей мостов выбрано 6 полимеров и композитов на их основе [1]. Численное моделирование фрикционного контактного взаимодействия элементов сферических опорных частей выполнено в рамках общей математической постановки задачи контакта, ранее описанной в [2].



Расчетная схема: 1 – стальная плита со сферическим сегментом; 2 – стальная плита со сферическим вырезом; 3 – антифрикционная полимерная прослойка

В работе также выполнен анализ влияния толщины антифрикционной прослойки h_p на напряженно-деформированное состояние контактного узла в целом и зону контакта в частности. Рассмотрено три варианта толщины антифрикционной прослойки 4, 6 и 8 мм. Максимальная высота верхней плиты, минимальная высота нижней плиты со сферическим вырезом и максимальная ширина конструкции не изменяются и равны $h_1 = 30$ мм, $h_2 = 20$ мм и $b_k = 2b = 155$ мм соответственно. Коэффициент трения для всех рассмотренных материалов постоянный 0,04.

В рамках работы выполнена серия численных экспериментов, направленная на оценку влияния свойств антифрикционных полимеров и композитов на их основе на параметры зоны контакта: контактное давление, контактное касательное напряжение, распределение зон контактных состояний и т. д. А также анализ напряженно-деформированного состояния антифрикционной прослойки: интенсивность напряжений, интенсивность пластических деформаций, перемещения по нормали относительно свободного края прослойки S_{k3} и т. д.

Исследование выполнено за счет Российского научного фонда (проект № 18-79-00147).

Литература

1. Адамов А. А., Каменских А. А., Носов Ю. О. Математическое моделирование поведения современных антифрикционных полимеров // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – № 4. – С. 43–56.
2. Kamenskih A. A., Trufanov N. A. Regularities of interactions between elements of a spherical contact unit with an antifriction polymeric interlayer // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36 (2). – P. 170–176.

ДИАГНОСТИКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗУБНОГО РЯДА ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЧЕРЕЗ ЗАЩИТНЫЕ ЗУБНЫЕ ШИНЫ

Каменских А. А., Устюгова Т. Н., Авдеева Е. С.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614000, Российская Федерация,
e-mail: anna_kamenskih@mail.ru*

В рамках работы выполнено численное исследование влияния геометрической конфигурации зубов антагонистов и протетических конструкций на напряженно-деформированное состояние элементов зубочелюстной системы человека при разном уровне физиологических воздействий, а также анализ контактного деформационного поведения биомеханических узлов. Построены параметризованные модели фрикционного контактного взаимодействия элементов зубочелюстной системы с учетом и без учета протетических конструкций разной геометрической конфигурации: индивидуально-адаптируемые и индивидуальные, однослойные и многослойные и др. Выполнена серия численных экспериментов, направленная на выявления качественных и количественных закономерностей деформационного поведения биомеханических узлов.

На первом этапе реализации задачи исследовано влияние использования традиционной конструкции защитной зубной шины с прослойкой из А-силикона. В рамках серии численных экспериментов установлено, что максимальный уровень контактного давления в среднем ниже в 10 и более раз, чем при контакте элементов зубочелюстной системы человека без учета протетической конструкции, а контактное касательное напряжение в 4 раза меньше контактного давления. Также установлено влияние упругопластического деформирования каппы на характер распределения контактного давления и контактного касательного напряжения. Наблюдается падение максимальной интенсивности напряжений в твердых тканях зубов (в среднем максимальная интенсивность напряжений у зуба из верхнего зубного ряда при контакте через каппу в 11–15 раз меньше; для зуба из нижнего зубного ряда – в 11–19 раз меньше), наибольшее снижение уровня интенсивности напряжений наблюдается при толщине каппы 2 мм. Данный эффект связан с тем, что при контактном деформировании объем основного материала каппы в зоне смыкания зубов максимален и подстраивается под геометрию зубной пары при пластическом течении материала. При увеличении толщины прослойки снижение уровня интенсивности напряжений меньше, чем у каппы с прослойкой 2 мм, на 3 и 10 % при толщинах прослойки 3 и 4 мм соответственно. Снижение максимального уровня интенсивности напряжений в твердых тканях зубов каппы толщиной 7 мм больше в среднем на 10 и 4 % для зубов верхнего и нижнего зубного ряда соответственно.

Вторым этапом исследования стала реализация задачи контактного взаимодействия пары зубов через однослойные и трехслойные индивидуально-адаптируемые и индивидуальные защитные зубные шины. Для однослойной каппы интенсивность напряжений снизилась на 72 % в зубе верхнего зубного ряда и на 47,4 % – в зубе нижнего зубного ряда; для трехслойной каппы интенсивность напряжений снизилась более чем на 80 % для зуба верхнего зубного ряда, для зуба нижнего зубного ряда – на 70 % для всех рассмотренных геометрий прослойки. Введение прослойки из А-силикона способствует уменьшению контактного касательного напряжения и контактного давления на 2 МПа. Максимальное снижение уровня интенсивности напряжений в твердых тканях зубов на 87,6 и 76,2 %, чем при контакте без учета каппы для зубов верхнего и нижнего ряда соответственно, дает прослойка, повторяющая геометрию зуба.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края и РФФИ (проект № 17-48-590411 p_a).

КЛИНИЧЕСКАЯ И ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭЛАСТОГРАФИИ В НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ФИБРОЗА СЕЛЕЗЕНКИ У БОЛЬНЫХ ХРОНИЧЕСКИМ ГЕПАТИТОМ С

Чернов В. С.¹, Патлусов Е. П.^{1,2},

¹ФГКУЗ «5 военный клинический госпиталь Войск Национальной Гвардии Российской Федерации»,
10, ул. Соболева, г. Екатеринбург, 620043, Российская Федерация

²Уральский государственный медицинский университет,
3, ул. Репина, Екатеринбург, 620014, Российская Федерация

Актуальность проблемы. Несмотря на достигнутые в последние годы успехи в лечении вирусных гепатитов (ВГ) заболеваемость ими остается на высоком уровне. По данным литературы, в мире насчитывается более 700 млн чел., инфицированных вирусом гепатита С (ВГС), что составляет около 1 % населения Земли. В России инфицировано HCV более 5 млн чел. По данным ВОЗ, ежегодно в мире умирает около 2 млн человек от патологии, связанной с ХВГ. В «5 ВКГ ВНГ РФ» хронические гепатиты (ХГ) твердо занимают 2-е место среди всех инфекционных патологий, уступая лишь ОРЗ. Ультразвуковая эластометрия (УЗЭ) селезенки – новый и перспективный метод неинвазивной диагностики фиброза, определение жесткости с помощью эластометрии (FibroScan, ECHOSENS, Франция). В основе метода лежит использование корреляции механических свойств тканей печени и селезенки, в частности их эластичности, со степенью выраженности фиброза. Измерение эластичности печени и селезенки проводится через межреберья при помощи специального датчика, испускающего низкочастотные механические импульсы. Скорость распространения возникающей волны сдвига определяется доплеровским датчиком. Эластометрия позволяет оценить наличие фиброза, судить об изменении эластических свойств органа и темпов прогрессирования фиброза. Преимущества эластографии – в ее высокой диагностической точности, скорости исследования (10 мин), отсутствии специальной подготовки пациента, исключении хирургических (инвазивных) осложнений и необходимости организации специализированного помещения. Безопасность метода позволяет проводить динамическое наблюдение с помощью повторных исследований за больными ХГ вирусной этиологии с целью коррекции терапии и оценки прогноза течения заболевания.

Цель работы – дать клиническую и прогностическую оценку применения УЗЭ в неинвазивной диагностике фиброза селезенки у пациентов с ХГС.

Материалы и методы. Исследование проводилось в «5 ВКГ ВНГ РФ». В исследовании участвовали 350 пациентов с ХГС, находившихся на лечении в инфекционном отделении госпиталя в 2018–2019 гг. Группа больных ХГ С набрана методом слепой выборки согласно критериям включения. При проведении УЗЭ селезенки было установлено, что у пациентов страдающих ХГС, фиброзирование селезенки развивается раньше, чем фиброз печени. Это свидетельствует о развитии фиброза пульпы или повышении давления в ней, нарушении микроциркуляции, и, соответственно, развитии портальной гипертензии (ПГ). Так, при стадии фиброза печени F2 изменения в селезенке, как правило, соответствуют стадии L3–L4, т. е. морфологические изменения в ткани селезенки наступают раньше, чем развитие синдрома ПГ. Пациентам с фиброзом селезенки L2 и более должна безотлагательно назначаться противовирусная терапия. Также по развитию фиброза селезенки можно оценивать прогноз течения заболевания ХГ.

Выводы. Дополнительным критерием оценки степени цирроза печени, индуцированного HCV, является УЗЭ селезенки, при которой выявляется опережение процессов фиброобразования в сравнении с печенью. УЗЭ печени и селезенки целесообразно использовать для неинвазивной диагностики АБП, в случае, когда пациент отказывается от пункционной биопсии или она ему противопоказана. Дополнительное проведение УЗЭ селезенки позволяет прогнозировать развитие осложнения, в частности ПГ. Показатель эластичности селезенки отражает степень фиброза в тканях селезенки и может использоваться для его определения. Изменение параметров эластичности селезенки характеризует качество проводимой терапии, что может использоваться в практическом здравоохранении.

РАЗЛИЧИЯ В ПЬЕЗОМОДУЛЯХ ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТОВ В ПОРИСТЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПОР

Наседкин А. В.¹, Наседкина А. А.¹, Нассар М. Э.^{1,2}, Раджагопал А.³

¹Южный федеральный университет,
8 а, ул. Мильчакова, 344090, Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
e-mail: nasedkin@math.sfedu.ru

²Университет Менуфия, 32952, Эль-Менуфия, Египет,

³Индийский технологический институт Хайдерабада, 502205, Хайдерабад, Индия

Пьезоэлектрические материалы широко применяются в качестве активных элементов различных излучателей, сенсоров и актуаторов, поскольку могут преобразовывать механическую энергию в электрическую, и наоборот. Со времени обнаружения этих материалов было известно, что модули прямого и обратного пьезоэффектов равны. Для повышения эффективности при различных приложениях в последнее время активно разрабатываются композитные пьезокерамические материалы. Так, пористая пьезокерамика нашла применение в гидроакустике, излучателях медицинского ультразвука, пьезогенераторах «зеленой» энергии и др. Преимущества пористой пьезокерамики заключаются в ее низком акустическом импедансе при достаточно высоких некоторых пьезомодулях. Однако пористая пьезокерамика менее прочна по сравнению с плотной. А.Н. Рыбьянцом в НИИ физики ЮФУ была разработана технология получения пористых пьезокерамик, в которых на границах пьезокерамической матрицы с порами осаждены микрочастицы других веществ. В частности, по данной технологии можно получить пористую пьезокерамику с металлизированными границами пор. В работе численно решаются задачи гомогенизации для пористого пьезокерамического материала с полностью металлизированными поверхностями пор. При условии, что толщина металлического слоя на границах пор пренебрежимо мала, металлизацию можно промоделировать только заданием одинаковых значений электрических потенциалов на границах пор. Для определения свойств таких материалов использовался подход [1–3], включающий метод эффективных модулей, конечно-элементное решение набора краевых задач электроупругости со специальными граничными условиями и кубические модели представительных объемов, равномерно разбитых на отдельные кубические конечные элементы с материальными свойствами пьезокерамической матрицы или пор.

Для обычной пористой пьезокерамики ранее было получено, что те однотипные модули, которые можно вычислить из различных краевых задач, оказывались приблизительно одинаковыми. В частности, эффективные пьезомодули для прямого и обратного пьезоэффектов оказывались равными. Поэтому в компьютерной программе, вычисляющей материальные константы пьезокомпозиата, эффективные пьезомодули, найденные из различных краевых задач гомогенизации, усреднялись. Однако для пористой пьезокерамики с полностью металлизированными поверхностями пор авторы обнаружили различие в эффективных пьезомодулях для прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов, а также несимметричность некоторых из матриц эффективных упругих жесткостей. Эти результаты объясняются условиями эквипотенциальности на границах пор, препятствующими распространению электрического поля в объеме поры. Таким образом, полученные необычные значения эффективных модулей отражают особенности структуры, а не только физические свойства отдельных фаз пьезокомпозиата.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ № 075-15-2019-1928 и проекта РФФИ № 16-58-48009.

Литература

1. Nasedkin A., Nasedkina A., Rybyanets A. Finite element simulation of effective properties of microporous piezoceramic material with metallized pore surfaces // *Ferroelectrics*. – 2017. – Vol. 508. – P. 100–107.
2. Nasedkin A. V., Nasedkina A. A., Rybyanets A. N. Numerical analysis of effective properties of heterogeneously polarized porous piezoceramic materials with local alloying pore surfaces // *Mater. Phys. Mech.* – 2018. – Vol. 40. – P. 12–21.
3. Nasedkin A. V., Nasedkina A. A., Rybyanets A. N. Finite element modeling and analysis of the effective properties of inhomogeneously polarized porous piezoceramic material with partial metallization of pore surfaces // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2018. – Iss. 5. – P. 38–56. – URL: https://dream-journal.org/issues/2018-5/2018-5_181.html

ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА РЕНТЕГНОВСКИМИ МЕТОДАМИ

Андреев П. В.^{1,2}, Гудзь Д. А.², Сметанина К. Е.²

¹ФГБУН Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых,
49, ул. Тропинина, г. Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация,
e-mail: andreev@ihps.nnov.ru

²ФАГОУ ВО ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
23, просп. Гагарина, г. Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация,
e-mail: gudzik98@gmail.com

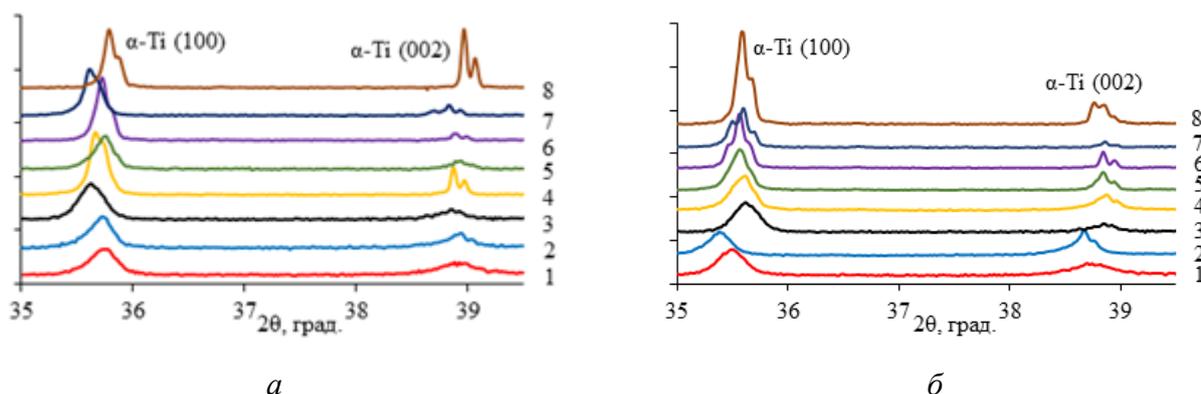
Псевдо- α -титановые сплавы, обладающие высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью в агрессивных средах, широко используются в ядерной энергетике и нефтехимической промышленности. Важной задачей является установление механизмов коррозионного разрушения, являющегося труднопрогнозируемым процессом [1].

Известно, что при значительном обогащении кислородом на поверхности титановых сплавов возникает дефектный слой – α -case [2]. Было решено провести исследование влияния обработки поверхности титановых сплавов на результаты рентгенодифракционных экспериментов.

Объектами исследования стали титановые сплавы ПТЗВ и ПТ7М, полученные по стандартным режимам термомеханической обработки (горячая деформация в β -области), используемые для изготовления теплообменного оборудования современных ядерных энергетических установок.

Послойный анализ проводился в три этапа: 1) последовательная полировка свежего среза образцов алмазной пастой до дисперсности частиц 1/0 мкм; 2) электрохимическая полировка ($V = 9$ В и $I = 2,5$ А) с использованием электролита (75 % H_2SO_4 и 25 % HF); 3) обработка концентрированным раствором HF.

Рентгенодифракционные эксперименты проводились на порошковом дифрактометре «Shimadzu XRD-7000» (CuK_{α} , $\lambda = 1,54$ Э). Условия съемки: щель перед детектором 0.15 мм диапазон углов $35-40^\circ$ с шагом сканирования $0,02^\circ$ и временем экспозиции 6 с. Эксперименты проводились после каждого этапа обработки (рисунок).



Участки дифрактограмм образцов ПТЗВ и ПТ7М после полировки: 1 – алмазной пастой с дисперсностью частиц 28/20 мкм; 2 – 14/10 мкм; 3 – 5/3 мкм; 4 – 1/0 мкм; 5 – электрохимической полировки в течение 30 с; 6 – полировки алмазной пастой с дисперсностью частиц 1/0 мкм; 7 – электрохимической полировки в течение 2 мин; 8 – обработки HF

Полировка поверхности образцов алмазной пастой дисперсностью частиц 1/0 мкм способствует проявлению тонкой структуры рассматриваемых пиков α -Ti. Проведение электрохимической обработки, наоборот, приводит к их «размытию».

Восстановление тонкой структуры пиков и повышение их интенсивности после обработки HF свидетельствует о возникновении дефектного слоя на поверхности исследуемых образцов в процессе электрохимической полировки.

Литература

1. Горынин И. В. Титановые сплавы для морской техник. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 384 с.
2. Donachie M. J. Titanium : A Technical Guide. – ASM international, 2000. – 216 p.

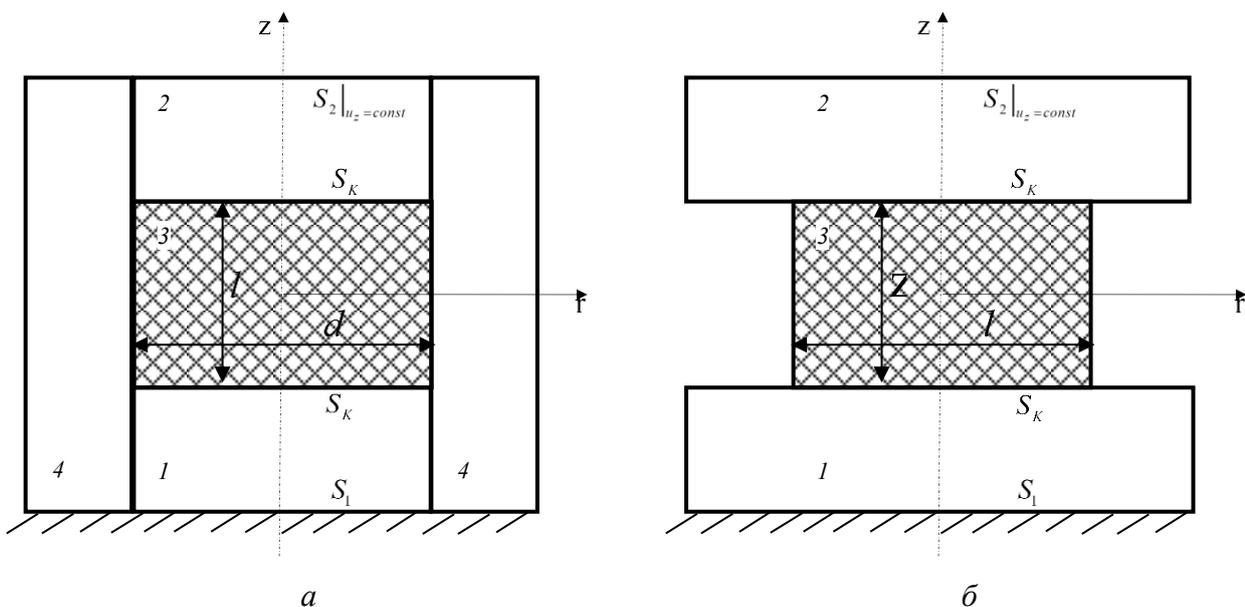
ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Адамов А. А., Каменских А. А., Носов Ю. О.

ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, Российская Федерация,
e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

В Институте механики сплошных сред УрО РАН выполнен цикл экспериментальных исследований физико-механических характеристик антифрикционных материалов при сложных многоступенчатых историях деформирования с разгрузками. В рамках серии натурных экспериментов было исследовано более 30 современных антифрикционных материалов и композитов на их основе, пригодных в той или иной мере в качестве слоев скольжения в узлах трения, таких как сферические опорные части, температурные швы и т. д. Из широкого набора материалов выбрано 6 современных антифрикционных полимеров и композитов на их основе, наиболее перспективных при использовании в узлах трения [1].

Для анализа работы современных антифрикционных материалов выполнено численное моделирование экспериментов на стесненное и свободное сжатие плитами пресса цилиндрических образцов диаметром и высотой 20 мм [2]. Реализована краевая задача деформационной упругопластичности в осесимметричной постановке с учетом фрикционного контактного взаимодействия по поверхностям сопряжения плит пресса и цилиндрических образцов (рисунок).



Численная модель эксперимента о деформировании при стесненном сжатии – а;
свободном сжатии – б

В рамках анализа деформационного поведения современных антифрикционных материалов на тестовых задачах установлено, что практически все рассмотренные полимеры при одноосном деформированном состоянии обладают почти упругим поведением со слабо нелинейным упрочнением; композиционные материалы на основе фторопласта обладают при стесненном и свободном сжатии более значимыми нелинейными и вязкоупругими эффектами, а также большей податливостью по сравнению с другими исследуемыми материалами. Результаты численного моделирования не противоречат результатам натурных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00903).

Литература

1. Адамов А. А., Каменских А. А., Носов Ю. О. Математическое моделирование поведения современных антифрикционных полимеров // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – № 4. – С. 43–56.
2. Adamov A. A., Kamenskikh A. A., Nosov Yu. O. Comparative analysis of the polymeric materials deformation behavior under squeezed and free compression // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 731. – P. 012007.

ПИЛОТНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНОЙ ГЕРОНТОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАЦИЕНТОВ СТАЦИОНАРА КРУГЛОСУТОЧНОГО ПРЕБЫВАНИЯ ГЕРОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Попов А. А., Беломестнов М. С., Исакова Е. В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
«Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения РФ,
г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация,
e-mail: art_popov@mail.ru*

Наблюдаемое в текущем веке изменение структуры населения с накоплением в популяции значительной доли лиц пожилого и старческого возраста обуславливает существенное увеличение нагрузки на систему здравоохранения и социальные службы.

Цель настоящего исследования – пилотная оценка клинического профиля пациентов, поступающих в стационарное геронтологическое отделение муниципального бюджетного учреждения здравоохранения «Центральная городская больница № 6» г. Екатеринбурга.

Материалы и методы. В одномоментное исследование были включены 33 пациента (30 женщин и 3 мужчины) последовательно госпитализированных в отделение гериатрии ЦГКБ № 6 с октября по декабрь 2019 г., давших согласие на участие в исследовании. Проведено комплексное гериатрическое обследование (КГО) всех пациентов. Для оценки статуса пациентов были использованы следующие шкалы: шкала психического статуса (MMSE), гериатрическая шкала депрессии, индекс активности Бартел, оценен 10-летний риск остеопоротических переломов с помощью алгоритма FRAX. Также учитывались такие аспекты как семейный статус, объем и вид физических нагрузок, образование, группа инвалидности, наличие хронической боли, уровни креатинина и витамина D, сыворотки, гемоглобина крови. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программных продуктов «Microsoft Office Excel 2013», «Statistica 13».

Результаты. Средний возраст обследованных составил $77,12 \pm 6,07$ лет, медиана – 78 лет. Состояли в браке – 5 чел., 18 чел. – жили одиноко, 9 чел. – с детьми, 1 пациентка – с сестрой. Инвалидность 2-й группы имели 6 чел., инвалидность 3-й группы – 5. Ежедневная физическая активность (в основном, прогулки) была отмечена у 22 чел., активность 2–3 раза в неделю – у 9 чел., 2 пациента отметили физическую нагрузку менее раза в неделю и отсутствие нагрузки. Хроническую боль испытывали 29 пациентов, 17 из них ежедневно принимали обезболивающие препараты. Индивидуальный 10-летний период риска остеопоротических переломов составил от 10 до 35 % (среднее значение $16,8 \pm 8,43$). Риск перелома шейки бедра составил от 3 до 36 % (среднее $6,58 \pm 6,55$), при этом порог медикаментозного вмешательства был превышен у всех обследованных [1].

Средний показатель по шкале MMSE составил $23,63 \pm 3,43$, по шкале депрессии – $5,32 \pm 4,17$. У 20 чел. выявлены когнитивные нарушения различной тяжести, 17 – имели критерии депрессивных расстройств. Социальный статус в данной выборке не влиял на частоту когнитивных и депрессивных расстройств. Индекс Бартел у всех пациентов составлял более 90 баллов, что говорит о минимальной зависимости от посторонних людей в повседневной жизни. У 19 чел. выявлен дефицит витамина D, 5 – недостаточность, у 5 – уровень витамина D был в пределах нормы [2].

Заключение. У самостоятельно живущих вне учреждений длительного ухода пациентов гериатрического отделения выявлено сочетание высокого риска падений, переломов, когнитивных и депрессивных расстройств, дефицита витамина D.

Литература

1. Лесняк О. М. Новая парадигма в диагностике и лечении остеопороза: прогнозирование 10-летнего абсолютного риска перелома (калькулятор FRAXtm) // Остеопороз и остеопатии. – 2012. – № 1. – С. 23–28.
2. Гериатрия : национальное руководство / под ред. О. Н. Ткачевой, Е. В. Фроловой, Н. Н. Яхно. – М. : ГЭОТАР–Медиа, 2018. – 608 с. : ил. – (Серия «Национальные руководства»).

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЯЧЕЙСТЫХ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЛП

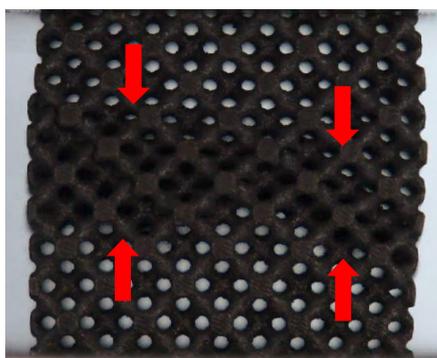
Муканов Г. Ж.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: usuals@bk.ru

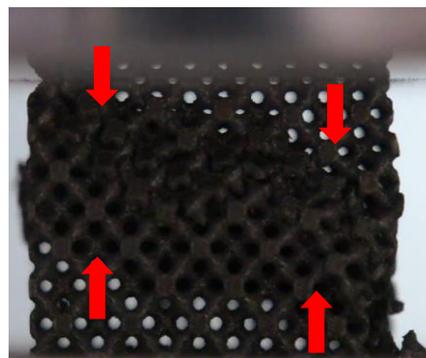
Основная задача исследования – определение механических свойств и поведения ячеистых структур. Для этого были проведены испытания на сжатие в испытательной машине Instron 3380.

Пластическая деформация при осадке образца с большим значением пор в материале протекает по иному пути, нежели в сплошном материале. Перенос схемы деформированного состояния сжатия бойками для сплошного материала приводит к появлению одной степени свободы, когда свободная поверхность образца может изгибаться по разным законам в зависимости от свойств материала, одновременно происходит перераспределение степени деформации в функции свойств материала. Вторая степень свободы появляется при наличии в образце пор: материал частично может перемещаться в сторону боковой поверхности, но может перемещаться и внутрь, заполняя поры. При пластическом сжатии образца круглые поры в сечении приобретают форму эллипсов, вытянутых в ортогональном направлении относительно сжатия.

По результатам опыта наблюдаются зоны локализации максимальных напряжений, в которых происходит пластическая деформация (указаны стрелками рис. *а*). Области пересечения перемычек в узлах ячеек средних рядов являются самыми опасными местами структуры. В образце с 60 % пор такая деформация имеет горизонтальный характер, ряды деформированных ячеек расположены горизонтально плоскости нагружения. Причинами локального разрушения являются недостаточная пластичность титановых сплавов и наличие не до конца проплавленных частиц, на что обращают внимание многие авторы. Наличие этих частиц может приводить к загрязнению окружающего пространства металлическими образованиями. В результате этого возникает и ослабление в целом конструкции имплантата. Поэтому было бы целесообразно, чтобы материал имплантата обладал не только высокими прочностными свойствами, но и достаточными пластическими свойствами. В этом случае локальное нагружение имплантата приводило бы к локальной деформации, причем даже за пределами упругости.



а



б

Механическое поведение образца с 60 % пор при сжатии: *а* – начало пластической деформации; *б* – распространение деформации

Как видно из рис. *б*, с увеличением нагрузки эквивалентная деформация переходит от средних рядов до места контакта образца с плитами, одновременно с этим в местах, где деформация протекала раньше, поры полностью сжимаются и происходит разрушение

перемычек. Выявлено, что изменение ячеистой структуры имплантата при нагружении происходит ступенчато. Вначале в процесс деформации и последующего разрушения вовлекаются перемычки ячеек. В последующем деформация распространяется по всему материалу. Изменение профиля ячейки по ходу испытания является скачкообразным процессом, связанным с локализацией напряжений и деформаций в вертикальных перемычках ячеистой структуры имплантата. Из-за этого на участке плато диаграммы нагружения в координатах «деформации–напряжения» образуются локальные экстремумы.

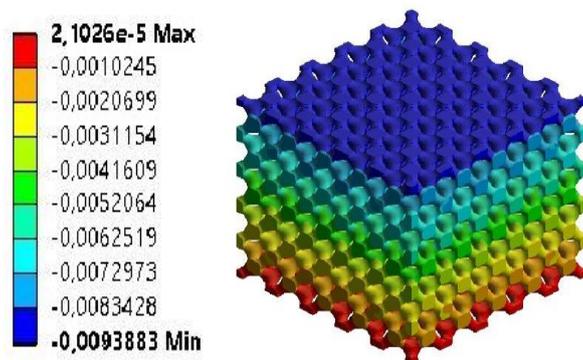
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ ТИТАНОВЫХ ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МКЭ

Муканов Г. Ж.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: usuals@bk.ru*

В исследовании было проведено математическое моделирование с использованием метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния и характеристика механического поведения титановых имплантатов.

На основе результатов НДС, полученных с помощью метода МКЭ, были поставлены задачи рассчитать модуль упругости и предел текучести ячеистого материала с разной долей пор (рисунок). Модуль упругости (E) ячеистой структуры оценивали по закону Гука.



Общее перемещение ячеистых структур с 60 % пор

Так для определения степени деформации ячеистых структур брали значения общего перемещения, найденные с помощью операции Directional Deformation с разной пористостью при нагрузке 5 кН.

Предел текучести пористого материала $\sigma_{0,2 \text{ пор}}$ ячеистой структуры оценивали по критерию фон Мизеса, где в числителе – предел текучести сплава Ti-6Al-4V (780 МПа), в знаменателе – максимальное эквивалентное напряжение по фон Мизесу, рассчитанное в ANSYS, и второй множитель – нагрузка, прикладываемая к пористому телу в программе ANSYS (8 МПа). Значения модулей упругости ячеистых структур с одинаковой пористостью, но разной архитектурой ячеек различаются. В таблице представлены рассчитанные модули упругости для образцов с разной пористостью. Модуль упругости ячеистой структуры будет определяться не только пористостью (плотностью материала), но и пространственной геометрией ячеистой структуры.

Результаты расчетов для ячеистых образцов с архитектурой алмаз

№ образца	Доля пор в образце, %	Перемещение в направлении оси Y, мм	Деформация образца, мм	Модуль упругости ячеистого образца, ГПа	Предел текучести ячеистого образца, МПа
1	50	0,0094	0,000376	21,28	55,7
2	60	0,0173	0,000692	11,56	51,2
3	70	0,0321	0,001284	6,23	29,8
4	80	0,0534	0,002136	3,75	14,5

С увеличением содержания пор в материале увеличиваются максимальные эквивалентные напряжения. Так, в образце с долей пор 50 % максимальное эквивалентное напряжение по фон Мизесу при нагрузке равной 5 кН достигает 112 МПа. У образца с долей пор 80 % значение максимального напряжения возрастает до 330 МПа. При увеличении пористости в пределах от 50 до 80 % снижаются упругие свойства ячеистых конструкций, но также снижаются прочностные характеристики, такие как предел текучести ячеистого материала и его предел прочности. Важной задачей является сбалансировать низкий модуль упругости и высокие прочностные свойства.

О НЕКОТОРЫХ МЕХАНОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР

Наймарк О. Б.

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

Результаты полевой теории дефектов использованы для исследования структурных аспектов поведения биологических мезо- и наноструктурных систем с целью объяснения нелинейной динамики клеточных структур. Принимая во внимание определение Шредингера о структуре ДНК как биологическом кристалле, механизмы функционирования ДНК клетки могут быть связаны с нелинейной динамикой дефектов (открытых комплексов), когда последние играют существенную роль при ДНК-трансформациях в силу характерных для дефектов длинно-корреляционных эффектов. Конечно-амплитудные флуктуации, например, соответствующие «дыханию» ДНК – (DNA breathing), наблюдаются экспериментально и связываются с формированием конечно-амплитудных возмущений, сопровождающих механизмы транскрипции, репликации и деления клеток. Роль дефектов связывается также с проявлениями пластичности, определяющими широкий спектр возможных фенотипов, соответствующих единому генотипу в различных условиях окружающей среды (например влияние гравитации), на котором формируется окончательная «конфигурация» системы. Закономерности критичности – структурно-скейлинговые переходы [1], обусловленные коллективным поведением ансамблей дефектов (открытых комплексов), исследуются с использованием оригинальных экспериментальных данных прижизненной динамики клеток – флуктуации «фазовых толщин», полученных методом лазерной (интерференционной) микроскопии. Анализ данных позволил установить мультифрактальную динамику, характерную для «пластического цикла», для клеток «в норме» и монофрактальную динамику для раковых клеточных линий [2]. Обосновывается вывод о соответствии монофрактальной динамики, обусловленной развитием коллективных «обостряющихся мод» в ансамбле открытых комплексов, режимам спонтанного деления клетки. Проводится сопоставление результатов анализа данных лазерной микроскопии прижизненной динамики клеток с результатами мультифрактального анализа динамики флуктуаций температурного поля при инфракрасном сканировании тканей «в норме» и признаками онкологических патологий [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60718X0202).

Литература

1. Naimark O. B. Structural-scaling transitions and localized distortion modes in the DNA double helix // Phys. Mesomech. – 2007. – Vol. 10. – P. 33–45.
2. Naimark O. B. Nonlinear dynamics and damage induced properties of soft matter with application in oncology // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 18882. – P. 020052.
3. Naimark O. B. Mesoscopic cell dynamics in different environment and problem of cancer // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167. – P. 020237.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО СЕТЧАТОГО СТЕРЖНЕВОГО ЭЛЕМЕНТА

Буров А. Е., Иванов В. А.

*Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
а/я 25515, 660049, Красноярск, Российская Федерация*

В работе представлены результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния и разрушения анизотропного стержневого элемента, выполненного из композиционного материала, под действием постепенно возрастающей нагрузки. Моделирование процесса разрушения основано на подходе континуальной механики поврежденности, связывающей накопление повреждений с деградацией механических свойств материала. Рассмотрены основные механизмы разрушения конструктивного элемента при различных видах нагружения.

ЛОКАЛЬНАЯ ЗАКАЛКА ПРОБИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ

Веремейчик А. И., Сазонов М. И., Хвисевич В. М.

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

Для повышения эксплуатационных свойств инструмента, оснастки, других деталей широкое применение получили технологические процессы упрочнения, основанные на использовании локальных высококонцентрированных плазменных источников нагрева. Требуемое качество деталей может достигаться путем изменения физико-механических свойств поверхностного слоя при воздействии на материал высокотемпературного источника тепла. В результате значительно увеличиваются износостойкость и долговечность деталей и инструмента. Особенностью таких технологических процессов упрочнения является отсутствие коробления деталей.

Для пробивки отверстий в крепежных деталях различного назначения часто в качестве пробивного инструмента применяют цилиндрические пуансоны. Визуальные обследования отработанных пуансонов показали, что происходит не только интенсивный износ их режущих частей, но и их искривление. Такой характер разрушения присущ деталям, упрочненным объемной закалкой и обусловлен возникновением в металле значительных механических напряжений и охрупчивания стали.

Для процесса поверхностного плазменного упрочнения рабочей зоны цилиндрических пуансонов, изготовленных из стали X12M, предлагается применить локальную закалку плазмотроном с высокой удельной мощностью. Струя плазмы направляется на торцы пуансонов, которые обжаты двумя медными пластинами для их интенсивного охлаждения и собраны в обойму. При равномерном движении плазмотрона производится интенсивный нагрев пуансонов и закалка их рабочих зон.

С применением вычислительного комплекса ANSYS проведено численное исследование температурного поля и НДС в созданной конечно-элементной модели системы «пуансон–обоймы» при воздействии высокотемпературного источника нагрева. Так как тепловой поток при плазменной закалке распределяется по диаметру пятна нагрева по закону, близкому к кривой вероятности Гаусса, то на торцевой поверхности, по которой движется плазменная дуга, коэффициент конвекции задается переменным по ширине пятна нагрева, также соответствующим нормальному распределению. Анализ полученных результатов температурного анализа показывает, что благодаря высоким скоростям охлаждения обеспечивается одновременность мартенситного превращения по всему контуру охлаждаемой детали, что исключает появление закалочных трещин. Исследовано распределение температурных полей по глубине диаметрального сечения пуансона, вдоль которого перемещается источник нагрева. При исследовании напряженно-деформированного состояния модель пуансона закрепляли по нижней торцевой и нижним боковым поверхностям. Для определения оптимальных режимов закалки проведено исследование НДС пуансона при различных скоростях движения источника нагрева, коэффициентах конвекции. Проведено сравнение результатов расчета температурных полей, эквивалентных напряжений и компонент вектора перемещений при различных скоростях движения плазменной дуги. Исследовано влияние тепловых и механических характеристик материала обойм на температурное поле, напряжения и перемещения в закаливаемом пуансоне.

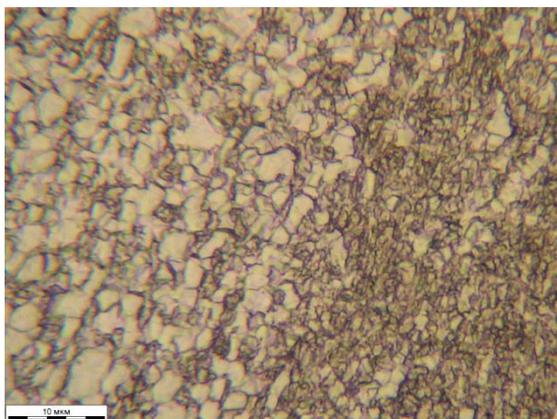
Плазменную закалку производили на созданной установке при токах дуги до 32 А. Скорость перемещения плазмотрона варьировалась от 5 до 25 мм/с. В результате проведенных экспериментов и обработки их результатов были определены оптимальные параметры процесса поверхностной закалки.

СТРУКТУРА МЕТАЛЛА ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 30ХГСН2А С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д., Мокрушина М. И.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Удм ФИЦ Уральского отделения РАН,
д. 34, ул. Т. Барамзиной, г. Ижевск, 426067, Российская Федерация,
e-mail: oka592@rambler.ru*

При изготовлении упрочненных цилиндрических осесимметричных полых деталей, работающих в условиях знакопостоянного асимметричного изгибного нагружения (валы, оси, пальцы траков и т. п.), возникает проблема зарождения усталостной трещины на внутренней поверхности детали, приводящей к ее разрушению. Это явление характерно при использовании в качестве заготовки горячекатаных особотолстостенных труб из легированных углеродистых сталей (30ХГСН2А, 38ХС и т. п.) в процессе высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), когда наружная поверхность обрабатывается наилучшим образом ($R_a < 1,25$), в то время как внутренняя поверхность упрочненной заготовки не обрабатывается по причине определенных технологических трудностей: высокой твердости поверхности после ВТМО (HRC, 55...57 ед.), неравномерного распределения припуска на механическую обработку по длине отверстия, большой протяженности заготовок (≥ 500 мм). Создание условий равной вероятности зарождения трещины на наружной и внутренней поверхности позволило бы достигнуть максимальной величины долговечности детали при эксплуатации. Для этого разработаны прогрессивные способы повышения качества поверхностного слоя трубного проката и исследована структура металла.



Структура внешнего края трубной заготовки

Измерения проводили на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке $P = 100$ гр.

Металлографический анализ образцов проводили на микроскопе Neophot-21, травление шлифов осуществляли 4 %-спиртовым раствором азотной кислоты. Анализируя значения микротвердости можно сделать следующие выводы. Микроструктура внешнего края образца представляет собой мартенсит (мартенсит деформации). На расстоянии 2 мм от края она переходит в троостомартенсит и такой же остается в основе металла. У поверхности внутреннего края – троостит, на расстоянии 2 мм от края троостомартенсит, основной металл – троостоомартенсит. Микроструктура внешнего края – мартенсит, далее переходит в троостомартенсит.

Эксплуатационные показатели, как неоднократно отмечалось, зависят не только от геометрических характеристик поверхности, но и от физико-механических свойств поверхностного слоя. Исследования по изучению качества внутренней поверхности показали, что большое влияние на физико-механические характеристики стали оказывают технология изготовления и последовательность операций в ней.

Выводы. Таким образом, из проведенных исследований структуры стали 30ХГСН2А следует, что материал полностью соответствует по характеру структуры и прочности традиционному упрочнению методом ВТМО и может использоваться в промышленности в качестве упрочненной заготовки для высоконагруженных технических систем.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Миховски М. М.

*Институт механики Болгарской академии наук, блок 4,
ул. ак. Г. Бончева, г. София, 1113, Республика Болгария,
e-mail: nntdd@abv.bg*

В работе представлен анализ методов для измерения механических напряжений при использовании методов шумов Баркгаузена и магнитоакустической эмиссии.

Представлены также и ультразвуковые методы, основанные на измерении скоростей продольных, поперечных, поверхностных и подповерхностных волн.

Приведены экспериментальные результаты испытаний газопроводов.

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ КОБАЛЬТОВЫХ СПЛАВОВ

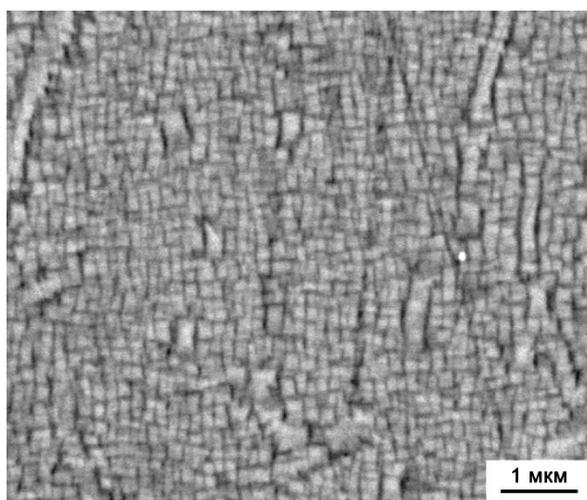
Давыдов Д. И., Казанцева Н. В., Пацелов А. М., Попов Н. А.

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
18, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,
e-mail: davidov@imp.uran.ru

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

В качестве альтернативы никелевым интерметаллидным сплавам сейчас рассматривают жаропрочные кобальтовые сплавы нового поколения на основе интерметаллида $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$. Они имеют похожую структуру с традиционными никелевыми сплавами, в которых упрочнение происходит за счет выделения интерметаллидной фазы [1]. В жаропрочных кобальтовых сплавах кроме твердого раствора на основе ГЦК-решетку кобальта (γ -фаза) и упрочняющей γ' -фазы на основе интерметаллида $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$, могут присутствовать различные интерметаллидные фазы [2]. В настоящее время идет поиск легирующих элементов, способствующих увеличению концентрационной и температурной стабильности интерметаллида в других системах с тугоплавкими элементами, способными заменить вольфрам. В качестве системы в настоящей работе используются Co-Al-Mo-Nb , в которой обнаружена похожая структура [3].

Проведено исследование структуры и фазового состава серии жаропрочных сплавов системы Co-Al-Mo-Nb в области предполагаемого существования интерметаллида $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{Mo}, \text{Nb})$. В работе использованы монокристаллы сплавов $\text{Co-10 ат. \% Al-xMo-yNb}$, где x меняется от 4 до 7 ат. %, а y – от 1 до 2,8 ат. %. В работе использованы методы дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгеноструктурного анализа, методы электронной просвечивающей и сканирующей микроскопии. По результатам исследований установлен фазовый состав сплавов и температурные интервалы фазовых переходов, связанных с образованием интерметаллидной фазы D0_{19} (650–750 °С) и распадом интерметаллидной γ' -фазы (800–900 °С).



Кубоидные выделения γ' -фазы

На рисунке представлена кубоидная γ/γ' -структура исследованных сплавов. Размер γ' -кубоидов зависит от содержания молибдена в сплаве, что требует дальнейшего исследования, поскольку формирование γ' -фазы связано с присутствием ниобия в сплаве, в тройной системе Co-Al-Mo упорядоченной γ' -фазы не наблюдается.

Кроме того, в сплавах присутствуют отдельные выделения $\text{B2}(\text{CoAl})$ фазы, появление которых возможно вследствие ликвации при кристаллизации расплава. В работе также опре-

делено влияние содержания ниобия и молибдена на фазовый состав сплавов и температурные границы области существования интерметаллидной фазы $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{Mo}, \text{Nb})$.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Давление», № АААА-А18-118020190104-3) при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-33-70221).

Литература

1. Cobalt-base high-temperature alloys / J. Sato, T. Omori, K. Oikawa, I. Ohnuma, R. Kainuma, K. Ishida // Science. – 2006. – Vol. 7. – P. 90–91.
2. Phase diagram of the Co–Al–W system structure and phase transformations near the $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ intermetallic composition range / N. V. Kazantseva, S. L. Demakov, A. S. Yurovskikh, N. N. Stepanova, N. I. Vinogradova, D. I. Davydov, S. V. Lepikhin // Physics of Metals and Metallography. – 2016. – Vol. 117 (7). – P. 701–709.
3. Makineni S. K., Nithin B., Chattopadhyay K. A new tungsten-free γ - γ' Co-Al-Mo-Nb-based superalloy // Scripta Materialia. – 2015. – Vol. 98. – P. 36–39.

MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES THROUGH DIGITAL IMAGE CORRELATION

Stoilov G., Pashkouleva D., Kavardzhikov V.

*Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,
e-mail: dessip@imbm.bas.bg*

The full-field optical technique based on digital image correlation (DIC) is a tool that is gaining popularity as a way to capture more detailed information about deformation fields of objects. The present work reports results of preliminary tests for the monitoring of timber walls applying this method. Efforts were dedicated to developing a software, as well as to arranging and calibrating a DIC system to be implemented for performing remote measurements of a timber wall deformation fields. It is shown that this DIC system allows one to obtain quantitative information about the complete fields of displacement in areas where other experimental devices are not so effective.

ГРАДИЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ УСЛОВИИ КВАДРАТИЧНОГО НАГРЕВА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ СЛОЯ

Привалова В. В., Просвирыков Е. Ю.

¹Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: valentprival@gmail.com

²Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: evgen_pros@mail.ru

В настоящей работе предлагается исследование нового точного решения, описывающего градиентное конвективное течение бесконечного горизонтального слоя вязкой несжимаемой жидкости [1, 2]. Актуальность изучения градиентных течений обоснована многочисленными примерами их применения в технически сложных научных задачах, в промышленности, медицинских и биологических процессах, а также химическом производстве.

Предложенное точное решение является обобщением известного класса Линя–Сидорова–Аристов [3, 7]. Компоненты поля скоростей представляют собой линейные функции продольной (горизонтальной) координаты с коэффициентами, зависящими от поперечной координаты. Поля температуры и давления являются квадратичными формами продольной (горизонтальной) координаты, включающими в себя также и линейные члены.

Для описания течения слоя жидкости используется система уравнений, включающая уравнение Обербека–Буссинеска, уравнение теплопроводности и уравнение несжимаемости. После подстановки предложенного точного решения в эту систему уравнений используется приближение Стокса, которое основано на предположении о преобладании вязких сил над инерционными эффектами, возникающими в движущейся жидкости. Стоит подчеркнуть, что полученное решение удовлетворяет нелинейным уравнениям Навье–Стокса. Интерпретация данного решения в качестве ползущего течения обусловлена тождественным обращением в нуль конвективной производной в уравнениях движения вязкой несжимаемой жидкости [8–11].

Для иллюстрации нового точного решения была рассмотрена краевая задача со следующими граничными условиями. На нижней, абсолютно твердой границе выполняется условие прилипания, а значение температуры принимается равным отсчетному (нулевому). На верхней свободной, проницаемой границе задается точечный нагрев, неоднородное распределение поля скоростей и поле давления с ненулевым продольным градиентом.

Показано, что скорость, параллельная плоским границам, имеет профиль, описываемый многочленом четвертой степени. Таким образом, учет горизонтальных градиентов температуры и давления приводит к возникновению застойных точек и областей противотечения в слое жидкости. Еще одной особенностью рассмотренного класса точных решений является квадратичный профиль вертикальной скорости, который можно объяснить учетом градиента горизонтальной скорости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – Москва : Наука, 1972. – 392 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. – 6-е изд. – Москва : Физматлит, 2006. – 736 с.
3. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвирыков Е. Ю. Плоская линейная конвекция Бенара–Рэлея при квадратичном нагреве верхней границы слоя вязкой несжимаемой жидкости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – Т. 71 (2). – С. 69–75.

4. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное неизотермическое течение Куэтта. Квадратичный нагрев верхней границы слоя жидкости // Нелинейная динамика. – 2016. – Т. 12 (2). – С. 167–178.
5. Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное конвективное течение Куэтта при линейном нагреве нижней границы слоя жидкости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – Т. 71 (5). – С. 148–153.
6. Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Стационарное конвективное течение Куэтта–Хименца при квадратичном нагреве нижней границы слоя жидкости // Нелинейная динамика. – 2018. – Т. 14 (1). – С. 69–79.

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ В СВЧ-ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ПАРАМЕТРЫ ВИБРОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ УДАРОМ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Злобина И. В., Бекренев Н. В., Кацуба И. С.

*СГТУ имени Гагарина Ю.А.,
77, ул. Политехническая, г. Саратов, 410054, Российская Федерация,
e-mail: irinka_7_@mail.ru; nikolaj.bekrenev@yandex.ru*

Эксплуатационным требованиям к ПКМ придается первостепенное значение. В частности к угле- и стеклопластикам, используемым в производстве авиационной техники, предъявляются требования теплостойкости, водо- и атмосферостойкости, прочности при растяжении вдоль волокон, прочности при сжатии вдоль волокон, трансверсальной (поперек волокон) прочности, межслоевому сдвигу, ударной вязкости, технологичность [3–5].

Применительно к ПКМ внешние факторы вызывают развитие физико-химических процессов в материалах, особенно в зоне контактного взаимодействия «матрица–волокно» и с крепежными металлическими элементами, что вызывает изменение эксплуатационных и, в частности, прочностных показателей.

Выполненные исследования свидетельствуют о положительном влиянии обработки в СВЧ электромагнитном поле отвержденных ПКМ.

Исследовали процесс зарождения и затухания волновых процессов в отвержденных угле- и стеклопластиках, инициированных ударом падающего с высоты 660 мм стального шара \varnothing 22,5 мм весом 47,44 г из закаленной стали ШХ-15 (HRC 50...55). Ориентация удара обеспечивалась трубчатой разборной направляющей.

Для проведения исследований использовано экспериментальное лабораторное место на базе компьютерного виброакустического комплекса ВК-01 с программным обеспечением ZetLab (ООО «Электронные технологии и метрологические системы», г. Зеленоград) и компьютерной тензометрической установки с программным обеспечением LabView. В экспериментах использовали плоскопараллельные образцы угле- и стеклопластика производства ООО «Еврокомплект (г. Калуга) с размерами 250×35×5 мм. Использовали по 5 контрольных образцов каждого материала, подвергнутых воздействию в течение 2 мин СВЧ-электромагнитного поля частотой 2450 МГц с плотностью потока энергии (ППЭ), равной $(17–18) \times 10^4$ мкВт/см². При данных параметрах обеспечивается наибольшая степень упрочнения ПКМ при статических испытаниях.

Для контрольных и опытных образцов угле- и стеклопластика характерно снижение значений как максимального, так и среднего виброускорения после нахождения в течение месяцев в условиях воздействия внешней среды. Для контрольных образцов углепластика и стеклопластика снижение значений максимального виброускорения составило соответственно 62 и 87 %. Для опытных образцов снижение составило 60 и 32 %. Изменение значений средних виброускорений явно отмечается у образцов углепластика – на 59 и 43 %, т. е. сохраняется тенденция к уменьшению изменений параметра. Для стеклопластика можно констатировать, что воздействие внешних факторов не оказывает влияние на средние виброускорения как контрольных, так и опытных образцов стеклопластика. По сравнению с контрольными образцами у опытных образцов угле- и стеклопластика отмечается явная тенденция к снижению средних значений виброускорения: для стеклопластика – на (43–59) %, для углепластика – на (40–46) %.

Уменьшение влияния факторов внешней среды на виброволновые параметры ПКМ, обработанных в СВЧ-электромагнитном поле, позволяет с большей достоверностью прогнозировать эксплуатационные характеристики изделий и обеспечивать их стабильность в условиях воздействия факторов внешней среды.

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых МК-2692.2019.8 «Выявление влияния климатических и временного факторов на проявление и сохранение эффектов микроволнового модифицирующего квазиструктурирования отвержденных полимерных композиционных материалов на примере угле- и стеклопластиков».

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ ЯЧЕЕК ВАЛКОВОГО ПРЕССА

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

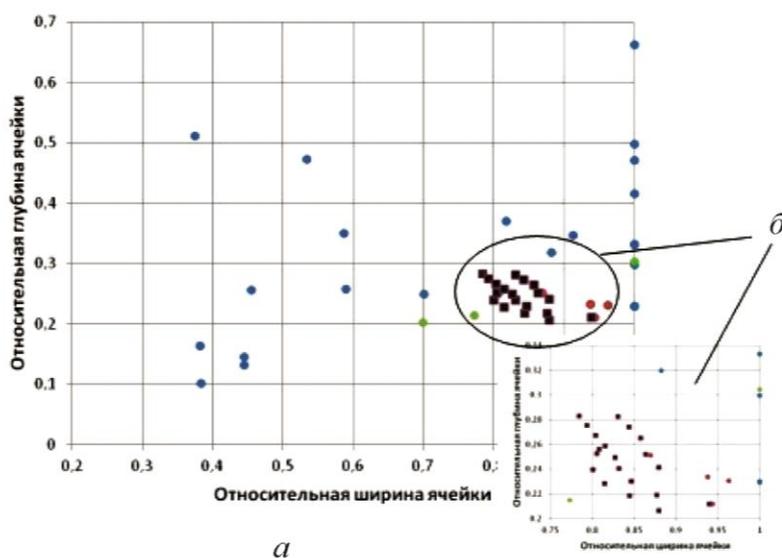
¹ООО «Спайдермаш»,
54, Студенческая, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: info@spidermash.ru

²Институт машиноведения УрО РАН,
34, Комсомольская, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: fupi_vs@e1

³ФГАУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
19, Мира, 620002, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: j.n.loginov@urfu.ru

Цель работы – проектирование рациональных параметров деформирующего инструмента для валкового брикетирования отходов металлургического производства (стружки, окалины, пылей, шламов и др.), а также рудного сырья. Эти материалы представляют собой мелкодисперсные порошки.

Эффективность работы технологического оборудования для валкового брикетирования главным образом зависит от геометрических размеров инструмента валкового пресса. Деформирующим инструментом является валок (или бандаж валка) пресса. Важным показателем эффективности работы является производительность валкового пресса. Производительность пресса в процессе брикетирования зависит от следующих показателей: объема ячейки (нарезанной на валке механическим способом); размеров валков (диаметра и ширины валка); зазора между двумя вращающимися валками; угловой скоростью вращения валков; плотности брикетируемой шихтовой смеси.



Относительные размеры ячеек на валках прессов (а) (относительно ячеек ООО «Спайдермаш»), участок диаграммы представлен укрупненно (б)

В работе выполнен анализ литературных данных и результатов промышленных исследований по брикетированию различных мелкодисперсных материалов с целью определения рациональных размеров ячеек на валках (или бандажах валков) брикетировочного пресса [1–3].

На рисунке представлены относительные габаритные размеры ячеек валковых прессов, используемых различными исследователями и производителями брикетирующего оборудования, а также прессов ООО «Спайдермаш». Здесь относительные размеры таких ячеек:

B/L – относительная ширина ячейки; h/L – относительная глубина ячейки, где размеры ячейки на валке прессы: B – ширина ячейки; L – длина ячейки; h – глубина ячейки.

В работе представлены рекомендации по разработке формы и размеров конструктивных элементов ячейки валка (бандажа валка) для различных брикетируемых шихтовых материалов, например, отсева кокса, металлургической извести, окалины, хромовых руд, железорудных концентратов и др. [4, 5].

Доклад подготовлен по материалам сайта производителя валковых прессов <http://spidermash.ru/>. Работа выполнена при поддержке ГРАНТА РФФИ № 19-08-00765_А.

Литература

1. Подготовка окисленных никелевых руд к плавке / В. Н. Машенко, В. А. Книсс, В. А. Кобелев и др. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 324 с.
2. Полянский Л. И., Кобелев В. А., Ветошкин А. В. Оборудование для брикетирования отсева металлургической извести // Новые огнеупоры. – 2014. – № 3. – С. 99–100.
3. Полянский Л. И., Кобелев В. А., Ветошкин А. В. Оборудование для брикетирования отсева металлургической извести // Бюллетень «Черная металлургия». – 2013. – № 7. – С. 68–70.
4. Babailov N. A., Polyanskii L. I., Loginov Y. N. Briquetting Metallurgical Lime Screenings and Parameters Making it Possible to Improve Process Efficiency // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60 (5–6). – P. 576–580.

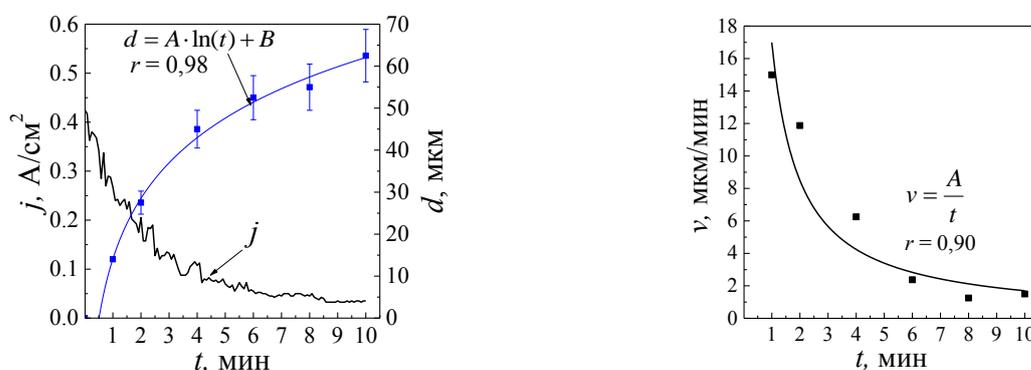
ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО УЛЬТРАЗВУКА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА КАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Казанцева Е. А.^{1,2}, Комарова Е. Г.², Шаркеев Ю. П.²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
д. 36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: kati10_95@mail.ru

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, просп. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: katerina@ispms.ru; sharkeev@ispms.tsc.ru

В работе исследовано влияние наложения внешнего ультразвукового (УЗ) поля в процессе микродугового оксидирования (МДО) на закономерности роста кальций-фосфатных (КФ) покрытий на поверхности титана. Синтез КФ покрытий проводили методом МДО на образцы из титана марки ВТ1-0 при условиях, описанных в работе. В зависимости от параметров наложенного УЗ в процессе МДО было получено три типа покрытий: МДО-покрытия (стандартный режим МДО без внешнего УЗ); МДО/ИУЗ-покрытия (МДО с импульсным УЗ, мощность УЗ – 35 Вт); МДО/НУЗ-покрытия (МДО с непрерывным УЗ, мощность УЗ – 100 Вт).



Зависимости плотности тока МДО и роста толщины КФ-покрытий (а) и скорости роста КФ-покрытий от времени нанесения покрытий (б)

На рис. а представлена зависимость плотности тока от времени нанесения МДО-покрытий, данный вид кривой типичен для всех режимов осаждения. Зависимость характеризуется наличием флуктуаций, свидетельствующих об импульсной природе микродуговых разрядов, и монотонным снижением со временем МДО. Это связано с ростом толщины диэлектрического КФ-покрытия на поверхности металла: в стандартном режиме толщина покрытия вырастает до 50 мкм за 10 мин, а в режимах с приложенным внешним УЗ толщина покрытия вырастает интенсивнее – до 60 мкм. Для всех режимов нанесения покрытий аппроксимирующие функции толщины от времени МДО имеют одинаковый логарифмический вид при $r \geq 0,98$ (рис. а).

В работе определены скорости роста МДО покрытий путем дифференцирования зависимостей толщины покрытия от времени нанесения. Найденные зависимости скорости роста покрытий во всех трех режимах описываются одинаковыми гиперболическими аппроксимирующими функциями при $r \geq 0,90$ (рис. б). В то же время, зависимости плотности тока от времени МДО также могут быть описаны гиперболическими аппроксимирующими функциями вида: $j(t) = A/(t + B)$ при $r \geq 0,97$ или $j(t) = A/t + B$ при $r \geq 0,43$. Таким образом, определение коэффициентов A и B у функций плотности тока и скорости роста покрытий, а также их корреляции между собой позволит управлять толщиной и свойствами покрытий (шероховатость, плотность, пористость и др.) путем регулирования плотности тока процесса МДО.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., направление III.23.2.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РОГОВИЦЫ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

Спевак Л. Ф., Бабайлов Н. А.

*ИМАШ УрО РАН,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: fupi_vs@e1.ru, lfs@imach.uran.ru*

Доклад посвящен разработке математических моделей, описывающих поведение роговицы глаза человека под действием внутриглазного давления и внешних воздействий на основе метода конечных элементов. Цель моделирования – исследование влияния лазерной коррекции зрения на напряженно-деформированное состояние роговицы. Основой модели является краевая задача упругого деформирования роговицы.

Проведенный обзор отечественных и зарубежных литературных источников показал, что большинство из разработанных к настоящему времени математических моделей человеческого глаза построены в конечно-элементных пакетах инженерного анализа, таких как FIDESYS, ANSYS, Abacus и др. Как правило, исследователи представляют роговицу сферической упругой конструкцией. В ряде исследований глаз представляется составной сферической оболочкой. Анализ найденных публикаций показал, что разработка новых математических моделей деформирования роговицы глаза для решения насущных проблем офтальмологии остается актуальной. В частности, недостаточно исследованным является вопрос влияния геометрических параметров роговицы на результат лазерной коррекции дальновзоркости.

В работе построена параметрическая конечно-элементная модель упругого деформирования осесимметричной роговицы глаза человека. Модель позволяет определить напряженно-деформированное состояние роговицы при заданных геометрических и механических параметрах. Проведены тестовые численные расчеты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 19-08-00765.

АНАЛИЗ НЕОДНОМЕРНЫХ СДВИГОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ

Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: nat_burm@mail.ru; evgen_pros@mail.ru*

Повышенная минерализация одних слоев жидкости по сравнению с уровнем минерализации других ее слоев приводит к возникновению концентрационной конвекции. Этот вид конвекции наиболее сильно проявляется для рассолов поверхностных водоемов, солончаков, соленосных пород и т. д. Однако концентрационная конвекция возникает не только в природных водоемах, но и в технических устройствах вследствие неоднородности распределения различного рода примеси в рабочей жидкости. При этом характеристики распределения примеси оказывают существенное влияние на характеристики потока.

В докладе рассматривается сдвиговое конвективное течение вязкой несжимаемой жидкости в горизонтальном слое, вызванное неравномерным распределением концентрации примеси. Для описания таких течений используем систему уравнений концентрационной конвекции, решение ищем среди классов обобщенных решений [1–5]. В качестве краевых условий полагается, что на нижней непроницаемой границе выполняется условие прилипания, верхняя граница слоя является неподвижной, на ней задано распределение солёности и давления.

В докладе получено решение описанной краевой задачи. Основное внимание уделено анализу свойств поля скоростей течения. Выведены условия, при выполнении которых течение сводится к однонаправленному. Показано, что каждая из компонент скорости может иметь не более одной нулевой точки, т. е. слой жидкости может разделяться на две зоны, при переходе из одной в другую жидкость меняет направление течения. Приведено соответствующее условие. Показано, что поле скорости может иметь одну глобальную застойную точку только в случае однонаправленного течения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. An Exact Solution to the Description of a Unidirectional Marangoni Flow of a Viscous Incompressible Fluid with the Navier Boundary Condition. Velocity Field Investigation // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2019. – Iss. 5. – P. 23–39. – DOI: 10.17804/2410-9908.2019.5.023-039. – URL: http://dream-journal.org/issues/2019-5/2019-5_259.html
2. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu. Couette–Hiemenz exact solutions for the steady creeping convective flow of a viscous incompressible fluid, with allowance made for heat recovery // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. – 2018. – Т. 22 (3). – С. 532–548.
3. Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю. Термокапиллярная конвекция вертикально завихренной жидкости // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54 (1). – С. 114–124.
4. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Аналитические решения стационарной сложной конвекции, описывающие поле касательных напряжений разного знака // Труды института математики и механики УрО РАН. – 2017. – Т. 23 (2). – С. 32–41.
5. Зубарев Н. М., Просвиряков Е. Ю. О точных решениях для слоистых трехмерных нестационарных изобарических течений вязкой несжимаемой жидкости // Прикладная механика и техническая физика. – 2019. – Т. 60, № 6 (358). – С. 65–71.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ В СДВИГОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ

Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: nat_burm@mail.ru; evgen_pros@mail.ru*

В зависимости от причин, вызывающих изменения плотности жидкости, принято различать тепловую и концентрационную конвекцию. Явление концентрационной конвекции часто сопровождает течения рабочей жидкости в аппаратах и устройствах, работающих например с жидкими теплоносителями. Учет при моделировании таких течений обобщения гипотезы Буссинеска, предполагающей зависимость плотности жидкости от концентрации примеси и от температуры самой жидкости, приводит к тому, что поле скоростей течения и поле концентрации оказывают взаимное влияние друг на друга.

В докладе исследуются особенности сдвигового конвективного течения вязкой несжимаемой жидкости с примесью в горизонтальном слое. В качестве системы определяющих соотношений берется система уравнений концентрационной конвекции, состоящая из уравнения движения вязкой жидкости, уравнения изменения концентрации и условия несжимаемости. Решение ищем в классе функций, линейных по части координат [1–5]. В качестве краевых условий полагается, что на нижней непроницаемой границе выполняется условие прилипания, верхняя граница слоя является неподвижной, на ней задано распределение солёности и давления.

В докладе приведено полное решение поставленной краевой задачи. Основное внимание уделено анализу распределения поля концентрации внутри исследуемого жидкого слоя. Показано, что согласно решению краевой задачи для концентрационного поля его однородная (относительно горизонтальных координат) составляющая не обращается в нуль внутри слоя. Компоненты поля концентрации, линейно зависящие от горизонтальных координат, принимают постоянное значение всюду внутри слоя. Изучено изменение взаимного расположения изолиний концентрационного поля при переходе от одного сечения слоя жидкости к другому. Соответствующие выводы проиллюстрированы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю. Термокапиллярная конвекция вертикально завихренной жидкости // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54 (1). – С. 114–124.
2. Алексеенко Е. А., Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Слоистая конвекция Марангони при учете теплообмена по закону Ньютона-Рихмана. Сообщение 1. Исследование поля скоростей // Химическая физика и мезоскопия. – 2018. – Т. 20 (1). – С. 15–27.
3. Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений уравнений Навье–Стокса со степенной зависимостью скоростей от двух пространственных координат // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53 (1). – С. 112–120.
4. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu., Simonov M. A. Nonlinear Gradient Flow of a Vertical Vortex Fluid in a Thin Layer // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2019. – Vol. 15 (3). – P. 271–283.
5. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50 (3). – С. 294–301.

СВОЙСТВА ИЗОБАР СДВИГОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ

Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: nat_burm@mail.ru; evgen_pros@mail.ru*

Известно, что естественному перемешиванию расплавов способствует конвекция, обусловленная неравномерным распределением их плотности. Усилить это перемешивание можно посредством различного рода устройств и изменением условий окружающей область течения среды, например, изменяя давление на границах области течения таких жидких сред.

Перепад давления внутри области, заполненной вязкой жидкостью, может индуцировать ее течение. Классическим примером такого течения является течение Пуазейля. При этом если распределение давления еще зависит от горизонтальных координат (т. е. имеет место не только перепад давления в вертикальном направлении), то продольные градиенты давления также порождают дополнительные потоки, которые накладываются на классическое течение.

В докладе исследуется влияние давления на сдвиговое конвективное течение вязкой несжимаемой бинарной жидкости в горизонтальном слое. Для описания таких течений используется система уравнений концентрационной конвекции, в которую входит уравнение движения вязкой бинарной жидкости, уравнение изменения концентрации и уравнение несжимаемости. Решение системы определяющих уравнений ищем с помощью класса обобщенных решений [1–5], в котором скорости зависят только от вертикальной координаты, а давление и концентрация еще и линейным образом зависят от продольных (горизонтальных) координат. В качестве краевых условий полагается, что на нижней непроницаемой границе выполняется условие прилипания, верхняя граница слоя является неподвижной, на ней задано распределение солёности и давления.

Решение поставленной краевой задачи представляет собой набор полиномиальных функций. Полиномами наибольшей степени описывается фоновое давление. Исследованию свойств фонового давления, а также продольных градиентов давления уделено основное внимание доклада. Показано, что фоновое давление строго монотонно убывает по мере удаления от нижней границы слоя независимо от управляющих параметров краевой задачи. При этом продольные градиенты давления также описываются строго монотонными функциями, но характер монотонности определяется значениями продольных градиентов концентрации, заданными на верхней границе слоя жидкости. Соответствующие выводы проиллюстрированы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Thermocapillary Convection of a Vertical Swirling Liquid // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 54 (1). – P. 230–239.
2. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu., Simonov M. A. Nonlinear Gradient Flow of a Vertical Vortex Fluid in a Thin Layer // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2019. – Vol. 15 (3). – P. 271–283.
3. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Convective layered flows of a vertically whirling viscous incompressible fluid. Velocity field investigation // Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. – 2019. – Vol. 23 (2). – P. 341–360.
4. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Конвективное слоистое течение Экмана вязкой несжимаемой жидкости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 54 (2). – С. 213–220.
5. Ковалёв В. П., Просвиряков Е. Ю., Сизых Г. Б. Получение примеров точных решений уравнений Навье–Стокса для винтовых течений методом суммирования скоростей // Труды Московского физико-технического института. – 2017. – Т. 9 (1). – С. 71–88.

ОДНОНАПРАВЛЕННОЕ КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ПРИ УЧЕТЕ УСЛОВИЯ ИДЕАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

Бурмашева Н. В.^{1, а)}, Ларина Е. А.^{2, б)}, Просвиряков Е. Ю.^{1, в)}

¹Институт машиноведения УрО РАН,

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

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

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

e-mail: ^{а)}nat_burm@mail.ru; ^{б)}larinakaterina@hotmail.com; ^{в)}evgen_pros@mail.ru

Исследуется конвективное однонаправленное течение вязкой несжимаемой жидкости в бесконечном горизонтальном слое, удовлетворяющее условию нулевого расхода жидкости. Таким образом, фактически исследуется течение в замкнутом слое. Течение индуцируется неравномерным нагревом (охлаждением) границ этого слоя. Для моделирования этого процесса используется система уравнений тепловой конвекции, включающая уравнение движения вязкой жидкости, уравнение теплопроводности и уравнение несжимаемости [1–5]. Данная система уравнений является нелинейной системой в частных производных, поэтому исследование такой системы не является тривиальной задачей.

При рассмотрении задач о течении слоя вязкой жидкости, соприкасающейся с твердой неподвижной поверхностью, на контакте с этой поверхностью, как правило, выбирается условие прилипания, которое обращает поле скоростей на твердой границе в нуль. Однако экспериментальные данные часто показывают нарушение условия прилипания на твердой стенке, в результате чего реализуется условие скольжения. Отличительной особенностью представленного в докладе точного решения системы уравнений тепловой конвекции является выбор условия идеального скольжения. Идеальное скольжение реализуется на границе контакта жидкости с гидрофобной поверхностью. Физически это условие реализуется на границе между жидкостью и поверхностью за счет образования устойчивой газовой прослойки.

В докладе подробно исследованы свойства поля скорости течения и особенности распределения поля температуры при заданном однородном распределении давления на верхней поверхности исследуемого слоя жидкости. Показано, что поле скорости может стратифицироваться на две зоны независимо от значений, задаваемых на границах области течения, а фоновая температура принимает всюду значения только одного знака (относительно отсчетного значения). При этом форма изолиний результирующего теплового поля меняется при изменении параметра, определяющего нагрев (охлаждение) границ рассматриваемого слоя жидкости. Кроме того, в некоторых сечениях температура дважды может принимать некоторые значения, т. е. при движении от нижней границы слоя жидкости к верхней границе наблюдается попеременный ее нагрев и охлаждение.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu., Simonov M. A. Nonlinear Gradient Flow of a Vertical Vortex Fluid in a Thin Layer // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2019. – Vol. 15 (3). – P. 271–283.
2. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Convective layered flows of a vertically whirling viscous incompressible fluid. Velocity field investigation // Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. – 2019. – Vol. 23 (2). – P. 341–360.
3. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Thermocapillary Convection of a Vertical Swirling Liquid // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 54 (1). – P. 230–239.

4. Аристов С. Н., Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю. Плоская линейная конвекция Бенара-Рэлея при квадратичном нагреве верхней границы слоя вязкой несжимаемой жидкости // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2015. – № 2. – С. 69–75.
5. Gorshkov A. V., Prosviryakov E. Yu. Large-Scale Convection Flow of an Incompressible Fluid on a Rotating Inclined Plane // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2053. – P. 040029.

ОДНОНАПРАВЛЕННОЕ СЛОИСТОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОМ СЛОЕ ПРИ УЧЕТЕ УСЛОВИЯ ИДЕАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ, ИНДУЦИРОВАННОЕ НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Бурмашева Н. В.^{1, а)}, Ларина Е. А.^{2, б)}, Просвиряков Е. Ю.^{1, в)}

¹Институт машиноведения УрО РАН,

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

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

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

e-mail: ^{а)}nat_burm@mail.ru; ^{б)}larinakaterina@hotmail.com; ^{в)}evgen_pros@mail.ru

Доклад посвящен исследованию свойств установившихся слоистых однонаправленных конвективных течений вязкой несжимаемой жидкости в замкнутом горизонтальном слое. На верхней границе слоя полагаются заданными распределение поля температуры и поля давления, линейным образом зависящие от продольных (горизонтальных) координат. На нижней границе реализуется условие идеального скольжения, являющееся частным случаем условия проскальзывания Навье. С точки зрения физической реализации данное краевое условие имеет место на контакте жидкости с несмачиваемой твердой поверхностью.

В докладе приведено точное решение системы уравнений тепловой конвекции, полученное в рамках класса обобщенных решений, зависящих линейным образом от части координат [1–5]. Показано, что данное решение способно описывать противотечения в жидкости, а также стратификацию физических полей.

Подробно исследовано поле скоростей течения. Показано, что при определенном сочетании параметров, характеризующих неоднородность нагрева (охлаждения) границ и неоднородность распределения давления на верхней границе слоя жидкости, скорость может иметь две нулевые точки. Таким образом, поле скорости может расслаиваться на три зоны, в каждой из которых скорость принимает значения определенного знака. При этом отвечающее данному полю скоростей поле касательных напряжений может стратифицироваться только на две зоны, в одной из которых напряжения являются растягивающими, в другой – сжимающими.

При исследовании поля температуры было выявлено, что фоновая температура, тепловое поле, индуцированное заданием продольных градиентов температуры, могут обращаться в ноль внутри слоя, но только один раз. При этом существуют такие сочетания граничных параметров, что оба поля обращаются в ноль одновременно. Исследовано распределение изотерм результирующего теплового поля в зависимости от значений параметров, характеризующих неоднородность распределения термосиловых полей на границах слоя.

Все полученные в ходе проведения исследования и представленные в докладе результаты были проиллюстрированы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Ковалёв В. П., Просвиряков Е. Ю., Сизых Г. Б. Получение примеров точных решений уравнений Навье–Стокса для винтовых течений методом суммирования скоростей // Труды Московского физико-технического института. – 2017. – Т. 9 (1). – С. 71–88.
2. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Exact Solutions for Natural Convection of Layered Flows of a Viscous Incompressible Fluid with Specified Tangential Forces and the Linear Distribution of Temperature on the Layer Boundaries // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017. – Iss. 4. – P. 16–31. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.4.016-031. – URL: http://dream-journal.org/issues/2017-4/2017-4_145.html

3. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu. Linear Heating of the Upper Boundary of a Fluid Layer in the Case of Stationary Nonisothermal Couette Flow // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2053. – P. 040078. – DOI: 10.1063/1.5084516.
4. Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений уравнений Навье–Стокса со степенной зависимостью скоростей от двух пространственных координат // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53 (1). – С. 112–120.
5. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Convective layered flows of a vertically whirling viscous incompressible fluid. Velocity field investigation // Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. – 2019. – Vol. 23 (2). – P. 341–360

ДИФфуЗИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ ПУАЗЕЙЛЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ БИНАРНОЙ ЖИДКОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ

Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: nat_burm@mail.ru; evgen_pros@mail.ru*

В докладе рассматривается слоистое установившееся конвективное течение вязкой несжимаемой жидкости в бесконечном горизонтальном слое, индуцированное неоднородным распределением давления на одной из границ слоя и наличием примеси (солености) в жидкости. В определяющую систему соотношений помимо уравнения движения вязкой жидкости и закона сохранения массы для несжимаемой жидкости входит еще уравнение, описывающее распределение объемной доли примеси (солености) по всей области течения рассматриваемой жидкости.

Решение определяющей системы уравнений ищем с помощью класса обобщенных решений [1–5], в котором скорости зависят только от вертикальной (поперечной) координаты, а концентрация примеси и давление распределены линейным образом по горизонтальным (продольным) координатам. В докладе представлено общее решение определяющей системы уравнений в рамках выбранного класса, а также сформулировано соответствующее количество краевых условий, необходимых для нахождения значений постоянных интегрирования, фигурирующих в этом общем решении.

В докладе также приводится полное решение поставленной краевой задачи. Подробно анализируются особенности поля скорости, поля концентрации и поля давления. Изучаются зависимости свойств перечисленных полей от значений параметров, определяющих распределение поля давления и поля концентрации на верхней границе слоя. Показано, что построенное точное решение способно описывать множественные стратификации перечисленных гидродинамических полей. Все полученные в ходе исследования результаты проиллюстрированы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Complex Stationary Convection with Third-Kind Boundary Conditions at the Boundaries of a Fluid Layer // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2016. – Iss. 2. – P. 34–47. – DOI: 10.17804/2410-9908.2016.2.034-047. – URL: http://dream-journal.org/issues/2016-2/2016-2_81.html
2. Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений уравнений Навье–Стокса со степенной зависимостью скоростей от двух пространственных координат // *Теоретические основы химической технологии*. – 2019. – Т. 53 (1). – С. 112–120.
3. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu., Simonov M. A. An Exact Solution for the Description of the Gradient Flow of a Vortex Fluid // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2176. – P. 020012. – DOI: 10.1063/1.5135124.
4. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu. Couette–Hiemenz exact solutions for the steady creeping convective flow of a viscous incompressible fluid, with allowance made for heat recovery // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. науки*. – 2018. – Т. 22 (3). – С. 532–548.
5. Burmasheva N. V., Prosviryakov E. Yu. Thermocapillary Convection of a Vertical Swirling Liquid // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 54 (1). – P. 230–239.

КРУПНОМАСШТАБНОЕ КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Уральский Федеральный государственный университет,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: alex55gor@mail.ru; evgen_pros@mail.ru*

В работе исследуется крупномасштабное конвективное течение вязкой несжимаемой жидкости в экваториальной зоне. Течение описывается уравнениями Обербека–Буссинеска [1, 2] с учетом двух компонент силы Кориолиса. На границах потока заданы градиенты температуры. На свободной границе действует эффект Марангони [3,4]. На твердой границе выполняются условия прилипания. Решение исходной системы для искомых функций (температуры, давления, скоростей V_x и V_y) ищем в виде линейных функций по координатам x , y с коэффициентами, зависящими от координаты z ; скорость V_z полагается равной нулю [3–6]. Рассматривается предельный случай – конвективное течение в экваториальной зоне. При этом полагается, что широта места φ мала и может быть равной нулю. Выбранный класс точных решений позволяет исключить «лишнее» уравнение переопределенной системы.

После подстановки вида решения в исходные уравнения, получена краевая задача для системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Уравнения, входящие в систему, решаются последовательно. Решение для скоростей получено в виде полиномов третьего порядка. Проведен анализ существования и положения застойных точек. Определены значения параметра Марангони и относительной глубины, при которых появляются застойные точки. Показана возможность существования двойной застойной точки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Конвективное слоистое течение Экмана вязкой несжимаемой жидкости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 54 (2). – С. 213–220.
2. Ekman V. W. On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean Currents // Arkiv for Matematik, Astronomi, och Fysic. – 1905. – Band 2 (11). – P. 1–53.
3. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9 (3). – С. 3–9.
4. Алексенко Е. А., Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Слоистая конвекция Марангони при учете теплообмена по закону Ньютона-Рихмана. Сообщение 1. Исследование поля скоростей // Химическая физика и мезоскопия. – 2018. – Т. 20 (1). – С. 15–27.
5. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9 (3). – С. 3–9.
6. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Неоднородное конвективное течение Куэтта // Механика жидкости и газа. Известия Российской академии наук. – 2016. – № 5. – С. 3–9.

НЕОДНОРОДНОЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА-ПУАЗЕЙЛЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Уральский Федеральный государственный университет,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: alex55gor@mail.ru; evgen_pros@mail.ru*

Стационарное крупномасштабное течение Экмана–Пуазейля вязкой несжимаемой жидкости с учетом двух компонент силы Кориолиса описывается уравнениями Обербека–Буссинеска [1]. Однородным будем называть течение, в котором компоненты скорости зависят только от вертикальной координаты z . Течение неоднородное – компоненты скорости зависят от горизонтальных координат с вертикальной стратификацией.

Считается, что жидкость скользит по твердой поверхности и связь между касательными напряжениями и скоростями описывается по закону Навье [2]. Как частный случай описываемых решений можно рассмотреть условие прилипания жидкости к твердой поверхности. На свободной поверхности заданы касательные напряжения, моделирующие неоднородное влияние потока газа на жидкость. Течение исследуется в экваториальной зоне. При этом полагается, что широта места φ мала и можно положить ее равной нулю.

Решение ищем в классе линейных функций по горизонтальным координатам x, y с коэффициентами, зависящими от вертикальной координаты z [3–7]. Скорость и давление определяются 9 коэффициентами – функциями z . После подстановки вида решения в исходную систему получится краевая задача для переопределенной системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Для разрешимости задачи построено условие совместности. Таким образом, из шести коэффициентов, определяющих скорость, независимыми остаются только четыре. А два других выражаются через условие несжимаемости и условие совместности. Граничные условия на свободной поверхности также должны удовлетворять условиям совместности и несжимаемости. На твердой границе в данной задаче заданы однородные условия, заведомо удовлетворяющие условиям совместности и несжимаемости. Для определения скоростей получены две системы уравнений. Построено общее решение в полиномах и частное, соответствующее заданным граничным условиям. Проведены исследования некоторых частных случаев. Показано существование застойных точек.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Конвективное слоистое течение Экмана вязкой несжимаемой жидкости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 54 (2). – С. 213–220.
2. Neto C., Evans D., Vonnacurso E. Boundary slip in Newtonian liquids: a review of experimental studies // Reports on Progress in Physics. – 2005. – Vol. 39. – P. 2859–2897.
3. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // ТОХТ. – 2016. – Т. 50 (3). – С. 294–301.
4. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9 (3). – С. 3–9.
5. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Неоднородные течения Куэтта // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10 (2). – С. 177–182.
6. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Неоднородное конвективное течение Куэтта // Механика жидкости и газа. Известия Российской академии наук. – 2016. – № 5. – С. 3–9.
7. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Нестационарные слоистые течения завихренной жидкости // Механика жидкости и газа. Известия Российской академии наук. – 2016. – № 2. – С. 25–31.

НЕОДНОРОДНОЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА–ПУАЗЕЙЛЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Уральский Федеральный государственный университет,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: alex55gor@mail.ru; evgen_pros@mail.ru*

В работе построено аналитическое решение стационарного изотермического крупномасштабного течения Экмана–Пуазейля вязкой несжимаемой жидкости в бесконечно протяженном слое. Течение описывается уравнениями Обербека–Буссинеска [1].

На нижнем слое предполагаются условия прилипания жидкости к твердой поверхности. На верхнем слое заданы проекции вектора скорости, зависящие от горизонтальных координат. Течение рассматривается в гидростатическом приближении.

Используется класс решений, линейный по горизонтальным координатам x , y с коэффициентами, зависящими от вертикальной координаты z [2–7]. Получается, что скорость и давление определяются 9 коэффициентами. В том числе, скорость определяется 6 коэффициентами. После подстановки вида решения в исходную систему получим краевую задачу для переопределенной системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Для разрешимости задачи построено условие совместности. Таким образом, из 6 коэффициентов, определяющих скорость, независимыми остаются 4, а два других выражаются через условия несжимаемости и совместности. Граничные условия на свободной поверхности также должны удовлетворять условиям совместности и несжимаемости. На твердой границе в данной задаче заданы однородные условия.

С учетом условия совместности переопределенная система уравнений сводится к нескольким одноподобным системам обыкновенных дифференциальных уравнений. Граничные условия на свободной поверхности должны удовлетворять условиям несжимаемости и условиям совместности. На нижней границе твердой поверхности граничные условия однородны, и условия совместности выполняются автоматически. Построено асимптотическое приближение решения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Конвективное слоистое течение Экмана вязкой несжимаемой жидкости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 54 (2). – С. 213–220.
2. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Аналитические решения стационарной сложной конвекции, описывающие поле касательных напряжений разного знака // Труды института Математики и механики УрО РАН. – 2017. – Т. 23 (2). – С. 32–41.
3. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // ТОХТ. – 2016. – Т. 50 (3). – С. 294–301.
4. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9 (3). – С. 3–9.
5. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Неоднородные течения Куэтта // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10 (2). – С. 177–182.
6. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Неоднородное конвективное течение Куэтта // Механика жидкости и газа. Известия Российской академии наук. – 2016. – № 5. – С. 3–9.
7. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Нестационарные слоистые течения завихренной жидкости // Механика жидкости и газа. Известия Российской академии наук. – 2016. – № 2. – С. 25–31.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ СЛОИСТАЯ КОНВЕКЦИЯ БЕНАРА–МАРАНГОНИ ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ НЬЮТОНА–РИХМАНА

Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Уральский Федеральный государственный университет,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: alex55gor@mail.ru; evgen_pros@mail.ru*

В работе построена математическая модель нестационарной слоистой конвекции вязкой несжимаемой жидкости. Осуществлено математическое моделирование нестационарной слоистой конвекции Марангони вязкой несжимаемой жидкости, движущейся в бесконечной полосе [1–4]. Основное внимание уделено исследованию положения и смещения застойной точки решения со временем, возникновению и исчезновению противотоков [4–6]. Показано, что переопределенная начально-краевая задача в рамках представленного в статье класса точных решений уравнений Обербека–Буссинеска сводится к проблеме Штурма–Лиувилля. Нелинейное уравнение для определения собственных чисел задачи решается численно [2]. Приведен численный метод разрешения системы эволюционных и градиентных уравнений, описывающих течение жидкости. С помощью вычислительного эксперимента проведен анализ гидродинамических полей, который говорит о наличии противотечений в жидкости, их изменении при разгоне жидкости. Показана возможность возникновения и исчезновения противотоков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Аналитические решения стационарной сложной конвекции, описывающие поле касательных напряжений разного знака // Труды института математики и механики УрО РАН. – Том 23 (2). – С. 32–41.
2. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Слоистая конвекция Бенара–Марангони при теплообмене Ньютона – Рихмана // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 3 (1). – С. 1–12.
3. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // ТОХТ. – 2016. – Т. 50 (3). – С. 294–301.
4. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю., Спесак Л. Ф. Нестационарная слоистая тепловая и концентрационная конвекция Марангони вязкой несжимаемой жидкости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8 (4). – С. 445–455.
5. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9 (3). – С. 3–9.
6. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю., Спесак Л. Ф. Нестационарная конвекция Бенара–Марангони слоистых течений вязкой несжимаемой жидкости // ТОХТ. – 2016. – Т. 50 (2). – С. 137–146.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛА ЭКМАНА ДЛЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ГРАНИЧНОГО УСЛОВИЯ НАВЬЕ

Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Уральский Федеральный государственный университет,
д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: alex55gor@mail.ru; evgen_pros@mail.ru*

Угол Экмана – угол между вектором касательных напряжений на свободной поверхности и вектором скорости течения в верхнем слое. В работе [1] Экманом было показано, что для океана бесконечной большой глубины (течение жидкости в полупространстве) для изобарического течения угол равен 45° . Рассмотрен угол Экмана, возникающий при изотермическом течении с граничным условием проскальзывания Навье [2].

Для определения угла Экмана построено аналитическое решение уравнений Обербека–Буссинеска [3–5], описывающее слоистое изотермическое течение Экмана–Пуазейля с учетом двух компонент силы Кориолиса и условием Навье на нижней твердой границе. На верхней границе заданы компоненты вектора касательных напряжений. Используется представление скоростей в виде линейных функций горизонтальных координат.

Исследуется зависимость угла Экмана от градиента давления и коэффициента трения на твердой поверхности при конечной глубине океана.

Показано, что при достаточно большой глубине влияние трения отсутствует и угол равен 45° .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Ekman V. W. On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean Currents // Arkiv for Matematik, Astronomi, och Fysic. – 1905. – Band 2 (11). – P. 1–53.
2. Neto C., Evans D., Bonaccorso E. Boundary slip in Newtonian liquids: a review of experimental studies // Reports on Progress in Physics. – 2005. – Vol. 39. – P. 2859–2897.
3. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Конвективное слоистое течение Экмана вязкой несжимаемой жидкости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 54 (2). – С. 213–220.
4. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Аналитические решения стационарной сложной конвекции, описывающие поле касательных напряжений разного знака // Труды института Математики и механики УрО РАН. – 2017. – Т. 23 (2). – С. 32–41.
5. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // ТОХТ. – 2016. – Т. 50 (3). – С. 294–301.

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МЕХАНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ВТ-6, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ SLM-ПЕЧАТИ

Панин С. В.^{1,2}, Еремин А. В.^{1,2}, Бурков М. В.^{1,2}, Любутин П. С.¹, Бяков А. В.¹

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
г. Томск, Российская Федерация*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Российская Федерация,
e-mail: svp@ispms.tsc.ru*

Аддитивное производство находит все большее применение в различных отраслях промышленности. Так, например, в аэрокосмической отрасли традиционные компоненты заменяются на детали, изготовленные с использованием технологий 3D-печати, при этом одним из популярных материалов является сплав ВТ-6. Возможность изготавливать детали сложных форм, минимизируя последующую механообработку, позволяет существенно снизить расход материала и производственные затраты. Однако эти достоинства нивелируются неоднородностями, возникающими в структуре (в частности, в титановых изделиях могут одновременно формироваться мартенситные пластины различных размеров, видманштеттова структура и др.). В условиях высокоскоростного спекания частиц высоколегированных сплавов возникают структурно-фазовые неоднородности, являющиеся концентраторами напряжений, снижающими прочность, что требует как усовершенствования режимов печати, так и проведения постобработки.

В настоящее время для этих целей используются два подхода термическая обработка и горячее изостатическое прессование, первый из которых позволяет в небольших пределах варьировать микроструктуру, практически не оказывая влияния на дефектность, тогда как второй способен как оказывать положительное влияние на структуру материала, так и способствовать снижению числа дефектов печати, но преимущественно внутренних (воздействие на поверхность в данном методе небольшая). Требуется разработка новых эффективных подходов к постобработке напечатанных изделий, которые были бы эффективны в объеме материала и на поверхности, а также обладали технологичностью и дешевизной. В частности, один из таких подходов основан на ультразвуковой поверхностной ударной обработке (УПУО) с использованием высокоэнергетических потоков (лазерного электронно-лучевого или электрического).

Работа посвящена исследованию структуры, механических свойств, а также процессов развития деформации и разрушения образцов сплава ВТ6, изготовленных методом селективного лазерного сплавления, подвергнутых комбинированной механо-электрофизической обработке – УПУО, совмещенной с высокочастотным электрофизическим воздействием «УПУО+ВЭФВ».

Образцы из порошка сплава ВТ-6 были изготовлены методом послойного лазерного сплавления и имели следующие габаритные размеры: длина – 70 мм (вдоль оси z принтера) и поперечное сечением – 10×10 мм. Заготовки послойно распиливали на электроэрозионном станке для получения полос толщиной ~ 2 мм, которые затем проходили комбинированную постпечатную обработку «УПУО+ВЭФВ». Полученные образцы подвергали испытаниям на статическое и циклическое растяжение, в процессе которых проводилась запись сигналов акустической эмиссии и расчета полей деформаций методом DIC.

Полученные данные анализировали по принципу выявления характерных стадий на временных зависимостях изменения информативных параметров, связанных с развитием деформации. Были построены и исследованы комбинированные графики, включающие зависимости « ξ – ε », «скорость счета акустической эмиссии – ε » и «среднюю деформацию – ε », рассчитанные с помощью DIC. Обсуждается влияние постпечатной обработки на изменение структуры и деформационного поведения исследуемых материалов.

Работа выполнена в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» Министерства науки и высшего образования РФ; Соглашение № 05.583.21.0089, идентификатор проекта RFMEFI58318X0089. И при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 18-08-00516.

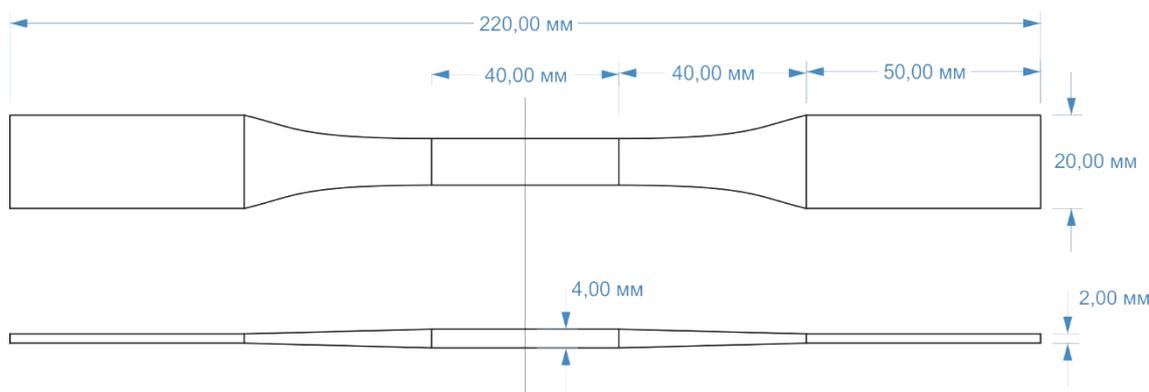
ОБРАЗЕЦ ДЛЯ КОРРЕКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА

Татусь Н. А.¹, Полилов А. Н.¹, Власов Д. Д.¹, Жавыркин В. В.²

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН,
4, Малый харитоньевский пер., Москва, 101000, Российская Федерация,
e-mail: nikalet@mail.ru

²Московский политехнический университет,
38, ул. Б. Семеновская, г. Москва, 107023, Российская Федерация,
e-mail: zhavyrkinv@mail.ru

Сложность определения механических характеристик однонаправленных волокнистых композитов давно известна [1]. Решение, предлагаемое в стандартах, в использовании накладок в зоне захватов, которые позволяют снизить концентрацию напряжений. В работе предлагается использовать другую форму образца (рисунок): внешне он напоминает стандартный образец с лопатками, но есть особенность – площадь поперечного сечения образца постоянна по его длине. Такой образец не может быть получен стандартной механической обработкой, поэтому для проверки теории, которая дает достаточно обнадеживающие результаты, в Институте машиноведения им. А.А.Благонравова РАН создается специальная установка для изготовления таких образцов с помощью намотки на оправку с последующим вакуумным формованием.



Внешний вид композитного образца для корректного испытания
по определению прочности

Проведенные МКЭ расчеты [2] несущей способности образца с криволинейным армированием показывают повышение ее примерно на 40 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 18-08-00372.

Литература

1. Полилов А. Н., Татусь Н. А. Биомеханика прочности волокнистых композитов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 328 с. – ISBN 978-5-9221-1760-9.
2. Образец для корректного испытания композитов на растяжение / В. В. Жавыркин, А. Н. Полилов, Н. А. Татусь, А. С. Арутюнова // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС–2019), Москва, 4–6 декабря 2019 г. : сборник трудов конференции. – М : Изд-во ИМАШ РАН. – С. 405–408.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВОЙ ТЕЧЕНИЯ СТАЛИ 08ПС С ЯВНЫМ УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА НА МЕЗОУРОВНЕ

Чирков А. О.¹, Еремин М. О.², Надежкин М. В.²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: chirkovartyem@gmail.com

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, просп. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация,
e-mail: eremin@ispms.tsc.ru; mvn@ispms.ru

Задача построения математических моделей, описывающих сложное поведение различных материалов, является актуальной для прогнозирования их поведения, а также конструкций на их основе. Основные закономерности поведения материала на макроуровне определяются механизмами мезо- и микроуровней. Так рассматриваемый материал (сталь 08пс) демонстрирует нелинейное поведение при одноосном растяжении, включая зуб текучести, площадку текучести, деформационное упрочнение. Данные закономерности тесно связаны со стадиями пластического течения материала и интегрально отражают механизмы более низких масштабных уровней.

В настоящей работе рассмотрено деформирование стали 08пс в условиях одноосного растяжения с явным учетом структуры материала на мезоуровне. Методом пошагового заполнения с использованием диаграмм Вороного выполнено моделирование структуры мезообъема материала в соответствии с экспериментальной диаграммой распределения зерен по размерам. В модели учтено влияние размера зерна на предел текучести. Внутри зерна материал считается изотропной упругопластической средой. На границе зерен задано условие идеального контакта. На основе трехмерного метода конечных разностей выполнено моделирование деформирования и разрушения рассмотренного материала. Стадийность кривой течения на макроуровне соотнесена с особенностями развития пластической деформации на мезоуровне и ее локализации. Результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными наблюдениями.

Математическое моделирование в работе выполнено при поддержке гранта РФФ 19-17-00122 (А.О. Чирков и М.О. Еремин), экспериментальная часть работы выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., направление III.23 (М.В. Надежкин).

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ТИПА КУЭТТА ПРИ УСЛОВИИ НАГРЕВА ГРАНИЦЫ ЖИДКОСТИ

Привалова В. В.¹, Просвиряков Е. Ю.²

¹Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: valentprival@gmail.com

²Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: evgen_pros@mail.ru

Исследована одна краевая задача конвективного течения горизонтального бесконечного слоя вязкой несжимаемой жидкости типа Куэтта [1, 2]. Движение жидкости описывается системой уравнений, состоящей из уравнения Обербека–Буссинска, уравнения теплопроводности и уравнения несжимаемости. Для решения этой системы используется точное решение, принадлежащее к классу Линя–Аристов–Сидорова [3–5].

Поле скоростей исследуемого точного решения представляет собой вектор с тремя ненулевыми компонентами в декартовой системе координат [5]. Таким образом, рассматриваемая задача является пространственно неоднородной [6]. Продольные (горизонтальные) компоненты вектора скорости представляют собой неоднородные линейные (по горизонтальным координатам) функции с коэффициентами, зависящими от поперечной (вертикальной координаты) [5]. Вертикальная компонента скорости является полиномом вертикальной координаты.

Поля температуры и давления содержат однородные слагаемые и квадратичные члены продольных координат. Коэффициенты полей температуры и давления являются степенными зависимостями от вертикальной переменной.

Для решения полученной системы нелинейной системы дифференциальных уравнений было применено приближение Стокса, используемое для описания модели сильно вязких жидкостей [1]. Таким образом, во всех уравнениях системы пренебрегаем произведениями функций второго порядка малости.

Краевая задача определяется следующими условиями. На нижней абсолютно твердой границе слоя жидкости выполняется условие прилипания и задан квадратичный закон нагрева. На верхней свободной, проницаемой границе слоя жидкости задаются ненулевые продольные компоненты вектора скорости, нулевая отсчетная температура и постоянное давление.

Полученное частное точное решение исследовано на возможность существования областей противотечений внутри рассматриваемого слоя жидкости. Также получены условия существования точек, в которых продольные компоненты завихренности могут менять знак.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Drazin P. G., Riley N. The Navier-Stokes Equations: A Classification of Flows and Exact Solutions. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2006. – 196 p.
2. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. – М. : Мир, 1973. – 760 с.
3. Lin C. C. Note on a class of exact solutions in magneto-hydrodynamics // Arch. Rational Mech. Anal. – 1958. – Vol. 1. – P. 391–395.
4. Аристов С. Н., Князев Д. В., Полянин А. Д. Точные решения уравнений Навье–Стокса с линейной зависимостью компонент скорости от двух пространственных переменных // Теоретические основы химической технологии. – 2009. – Т. 43 (5). – С. 547–566.
5. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50 (3). – С. 294–301.
6. Просвиряков Е. Ю., Спевак Л. Ф. Пространственно неоднородные слоистые течения вязкой несжимаемой жидкости // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52 (5). – С. 483–488.

О ВЛИЯНИИ ГРАДИЕНТНЫХ ЭФФЕКТОВ ДАВЛЕНИЯ НА ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ В ТРЕХМЕРНОМ КОНВЕКТИВНОМ ТЕЧЕНИИ

Привалова В. В.¹, Просвирыяков Е. Ю.²

¹Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: valentprival@gmail.com

²Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: evgen_pros@mail.ru

Конвективное градиентное течение бесконечного горизонтального слоя вязкой несжимаемой жидкости задается системой уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска. Предложенное точное решение, описывающее такое течение принадлежит классу решений Линя–Сидорова–Аристов [1–3]. Поля температуры и давления представляют собой квадратичные формы двух продольных координат с коэффициентами, зависящими от поперечной координаты [3]. Горизонтальные компоненты скорости содержат только неоднородные по продольным координатам слагаемые [3, 4]. Отличительной особенностью рассматриваемого течения является ненулевая вертикальная скорость в слое жидкости, что не позволяет рассматривать задачу в псевдоплоском приближении. Таким образом, в отличие от часто применяемой модели двумерного течения в предложенном исследовании поле скоростей в полном смысле является трехмерным [3].

При рассмотрении краевой задачи нижняя граница слоя жидкости предполагается абсолютно твердой, а верхняя – свободной, проницаемой [4–7]. На нижней границе выполнено условие прилипания и закон квадратичного нагрева. На верхней границе задаются ненулевые горизонтальные компоненты скорости, температура принимается за отсчетное (нулевое) значение. Коэффициенты при квадратичных членах поля давления на верхней границе являются постоянными, ненулевыми значениями, что характеризует перепад давления по поверхности слоя жидкости и определяет градиентное течение [3].

Полученные продольные компоненты вектора скорости содержат влияние заданного на верхней границе слоя жидкости параболического ветра [8, 9] в соответствующем направлении и изменение в этом же направлении полей температуры и давления. Поперечная компонента скорости выражается из уравнения несжимаемости через неоднородные слагаемые продольных компонент вектора скорости, а следовательно, включает в себя, как влияние параболического ветра на свободной поверхности, так и изменение температуры и давления в двух продольных направлениях. Полученная таким образом вертикальная скорость может наследовать особенности обеих горизонтальных скоростей слоя жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-00023-а.

Литература

1. Lin C. C. Note on a class of exact solutions in magneto-hydrodynamics // Arch. Rational Mech. Anal. – 1958. – Vol. 1. – P. 391–395.
2. Аристов С. Н., Князев Д. В., Полянин А. Д. Точные решения уравнений Навье–Стокса с линейной зависимостью компонент скорости от двух пространственных переменных // Теоретические основы химической технологии. – 2009. – Т. 43 (5). – С. 547–566.
3. Аристов С. Н., Просвирыяков Е. Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50 (3). – С. 294–301.
4. Privalova V. V., Prosviryakov E. Yu., Simonov M. A. Nonlinear Gradient Flow of a Vertical Vortex Fluid in a Thin Layer // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2019. – Vol. 15 (3). – P. 271–283.

5. Просвиряков Е. Ю. Точные решения трехмерных потенциальных и завихренных течений Куэтта вязкой несжимаемой жидкости // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2015. – Т. 4 (6). – С. 501–506.
6. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости.– М. : Мир, 1973. – 760 с.
7. Drazin P. G., Riley N. The Navier-Stokes Equations: A Classification of Flows and Exact Solutions. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2006. – 196 p.
8. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Т. 1. – М. : Мир, 1986. – 397 с.
9. Просвиряков Е. Ю., Спевак Л. Ф. Пространственно неоднородные слоистые течения вязкой несжимаемой жидкости // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52 (5). – С. 483–488.

УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА БИОИНЕРТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, ЦИРКОНИЯ И НИОБИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Майрамбекова А. М.^{1,2}, Банников М. В.³, Оборин В. А.³, Терехина А. И.³,
Ерошенко А. Ю.², Наймарк О. Б.³, Шаркеев Ю. П.^{2,4}

¹Национальный Исследовательский Томский государственный университет
д. 36, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация,
e-mail: aikol@ispms.ru

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

³Институт механики сплошных сред УрО РАН,
д. 1, Академика Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация

⁴Национальный Исследовательский Томский политехнический университет
д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация

Большой интерес к исследованиям металлических материалов в области много- и гига-цикловых усталостных нагрузок связан с возможностями повышения усталостного ресурса изделия за счет формирования наноструктурной (НС) и / или ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в объеме материала. Известно, что материалы в УМЗ-состоянии обладают более высоким уровнем механических свойств, в частности, сопротивлением к усталостному разрушению и циклической долговечности. В настоящее время актуальными являются исследования, посвященные влиянию НС и/или УМЗ-состояния на процессы разрушения материалов при гигациклических нагрузках.

В работе проведено сравнительное исследование влияния структурного состояния на усталостное поведение биоинертных сплавов ВТ1-0, Zr-1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb в режиме гигациклового нагружения с использованием метода инфракрасной термографии. Исследуемые образцы подвергались нагружению на ультразвуковой резонансной усталостной машине Shimadzu USF-2000 в режиме гигацикловой усталости при частоте 20 кГц с коэффициентом асимметрии цикла $R = -1$.

Установлено, что формирование УМЗ-структуры в исследуемых сплавах приводит к увеличению предела усталости титана ВТ1-0 в 1,6 раза, сплава Zr-1 мас. % Nb в 1,7 раза и сплава Ti-45 мас. % Nb в 1,5 раза в гигацикловой области (10^9 циклов) по сравнению с крупнокристаллическим состоянием. Показано, что процесс циклического деформирования для всех типов структурных состояний сопровождается зарождением и распространением очага тепловыделения в локальном объеме образцов и оказывает существенное влияние на величину усталостной прочности. Проведен анализ морфологии поверхности разрушения для всех образцов методами оптической, растровой и электронной микроскопии. Выполнено исследование рельефа изломов образцов из сплавов ВТ1-0, Zr-1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb в различных структурных состояниях методами фрактального анализа с помощью интерферометра-профилометра New View 5010 для определения характеристик коррелированного поведения многомасштабных дефектных структур, с которыми связано инициирование и рост трещины. Установлены количественные характеристики профиля поверхности разрушения, соответствующие характерным областям: очагу локализации поврежденности и зоне роста очага до размеров трещин, соответствующих кинетике Пэриса. Полученные значения масштабных инвариантов для характерных областей и соответствующие им значения пространственных масштабов использовались для интерпретации кинетики роста переходных режимов от кинетики «малых трещин» к кинетике «трещин Пэриса».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-32-50163 «мол_нр» и частичной поддержке Программы фундаментальных научных исследований СО РАН на 2017–2020 гг. III.23.2., проект III.23.2.2.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПУЧИВАНИЯ БАЛКИ ВСЛЕДСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

Радченко В. П.^{а)}, Афанасьева О. С.^{б)}, Глебов В. Е.^{в)}

*Самарский государственный технический университет,
244, Молодогвардейская, Самара, 443100, Российская Федерация,
e-mail: ^{а)}radchenko.vp@samgtu.ru; ^{б)}afanaseva.os@samgtu.ru; ^{в)}gve5770200@mail.ru*

Положительное влияние остаточных (сжимающих) напряжений вследствие поверхностно пластического упрочнения деталей хорошо изучено. С одной стороны, их наличие повышает ресурсные характеристики показателей надежности (сопротивление усталости, трибологические характеристики, коррозионное растрескивание и т. д.), с другой стороны, они часто приводят к короблению за счет технологических остаточных деформаций и изменению геометрии (превышению нормативно заданных технологических допусков). И если экспериментальным и теоретическим задачам определения остаточных напряжений посвящено, большое количество работ, то вопросы коробления рассматриваются лишь фрагментарно. В настоящей работе выполнен комплексный анализ влияния характера распределения остаточных напряжений, граничных условий и первоначальных геометрических параметров на выпучивание балки вследствие одностороннего ультразвукового поверхностно пластического упрочнения. На первом этапе на основании разработанной феноменологической модели выполнена реконструкция полей остаточных напряжений и пластических деформаций для балки 10×10×100 мм, при этом наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Однако данная методика не позволяет оценить изменение геометрических параметров упрочненной балки по сравнению с исходным неупрочненным состоянием. Поэтому для оценки влияния сформированных остаточных напряжений на выпучивание балки использован метод расчета по первоначальным деформациям на основании использования аналогии между первоначальными (остаточными) пластическими деформациями и температурными деформациями в неоднородном температурном поле. Это позволило свести рассмотрение задачи к задаче термоупругости, которая в дальнейшем решалась численно методом конечных элементов. Детально исследовано влияние четырех типов граничных условий закрепления торцов балки (жесткое закрепление торцов, жесткое и шарнирное опирание ребер в различных сочетаниях, консоль) на форму и величину изгиба балки. Установлено, что величина прогиба балки уменьшается при жестких закреплениях противоположных торцов и ребер по сравнению с их шарнирным опиранием. Исследовано влияние толщины балки, которая изменялась от 2 до 10 мм, на ее выпучивание при одинаковом распределении остаточных напряжений в упрочненном слое и установлен нелинейный характер возрастания стрелы прогиба с уменьшением толщины для всех типов граничных условий. Показано, что при всех граничных условиях кривизна по длине балки практически не изменяется, поэтому ее можно считать постоянной, т. е. гипотезу плоских сечений в балке можно использовать и после упрочнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ 19-19-0062).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ В ПРОЦЕССЕ АВТОКЛАВНОГО ФОРМОВАНИЯ

Ильиных Г. В., Сметанников О. Ю.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, Россия, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ilinykh.pnpu@yandex.ru*

В работе рассматриваются ключевые этапы разработки комплексной методики прогнозирования напряженно-деформированного состояния изделий из тканых композиционных материалов в процессе их изготовления. Для решения сопутствующих задач применен метод конечных элементов, реализованный в пакете ANSYS Mechanical APDL.

Первым этапом процесса изготовления многослойного изделия является выкладка препрега (заранее заполненного неотвержденным связующим пакета). Следующим этапом после начальной укладки армирующей ткани является этап создания вакуума между выложенной заготовкой и вакуумным мешком не ниже $0,9 \text{ кгс/см}^2$. Далее давление повышается до $2,0 \text{ кгс/см}^2$. После чего проводится многоступенчатый нагрев с выдержкой. Далее изделие охлаждается при сохранении давления. На заключительном этапе оболочка высвобождается из формы.

Исходя из особенностей армирования, гомогенный материал оболочки конструкции принято считать ортотропным. С помощью численных экспериментов [1–3] решается проблема нахождения эффективных вязкоупругих характеристик рассматриваемого изделия, в частности многослойной тонкостенной оболочки сложной топологии. Для этого решаются краевые квазистатические задачи термомеханики для представительного объема на микро- и мезоуровне. Полученные эффективные характеристики, соответствующие макроуровню, применяются при проведении численного моделирования поведения композитной оболочки в процессе вакуумно-автоклавного формования.

Моделирование формования на макроуровне представляет собой краевую квазистатическую задачу термомеханики. Нестационарное температурное поле определяется из соответствующей задачи теплопроводности, после чего в цикле (для каждого момента времени) данное решение подгружается для использования в качестве объемной нагрузки и проводится расчет по определению напряженно-деформированного состояния.

Полученные в работе результаты, основанные на разработанной численной методике определения термовязкоупругих характеристик тканевых многослойных композитов, позволяют оценить вклад релаксации напряжений в оболочке на эволюцию напряженно-деформированного состояния в процессе ее изготовления. Также разрабатываемая методика дает возможность предсказать появление технологических дефектов.

Литература

1. Соловьев А. Н., Зиборов Е. Н., Шевцов С. Н. Определение упругих свойств армированных композиционных материалов на основе конечно-элементного моделирования // Наука Юга России (Вестник южного научного центра). – 2016. – Т. 12 (2). – С. 3–10.
2. Советова Ю. В., Сидоренко Ю. Н., Скрипняк В. А. Многоуровневый подход к исследованию влияния объемного соотношения компонентов волокнистого однонаправленного углепластика на его механические характеристики // Вестник ТГУ. – 2014. – № 2 (28). – С. 77–89.
3. Куимова Е. В., Труфанов Н. А. Численное прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленного волокнистого композита с вязкоупругими компонентами // Вестник СамГУ. Естественная серия. – 2009. – № 4 (70). – С. 129–148.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНО ПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ И ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Радченко В. П.¹, Павлов В. Ф.², Бербасова Т. И.¹

¹Самарский государственный технический университет,
244, ул. Молодогвардейская, Самара, 443100, Российская Федерация,
e-mail: radchenko.vp@samgtu.ru

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
34 а, Московское шоссе, Самара, 443086, Российская Федерация,
e-mail: sopromat@ssau.ru

Методы расчета остаточных напряжений в полых и сплошных поверхностно упрочненных цилиндрических образцах развиваются как в экспериментальной области [1], так и в теоретических исследованиях [2, 3]. В подавляющем числе работ анализу и теоретической интерпретации подвергаются результаты одностороннего упрочнения внешней поверхности полых цилиндрических образцов [2, 3]. Цель работы – разработка методики расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций при двухстороннем упрочнении микрошариками внешней и внутренней поверхности тонкостенных трубок $\varnothing 12 \times 1$ мм из стали X18N10T. Данный конструктивный элемент является частью трубопроводов авиационных пневмогидросистем, которые находятся в условиях многоциклового силового нагружения, а как известно, сжимающие остаточные напряжения после процедуры дробеструйной обработки повышают предел сопротивления усталости.

Разработан феноменологический метод расчета остаточных напряжений и пластических деформаций при одновременном упрочнении внутренней и внешней поверхности, который базируется на обобщении подходов работ [2, 3], где предложена аналогичная модель, но лишь при упрочнении внешней поверхности. Расчет ведется в цилиндрической системе координат. Краевая задача включает уравнения равновесия и совместности деформации, граничные условия, гипотезу несжимаемости материала, постулируемую связь между окружной (q_θ) и осевой (q_z) компонентами тензора остаточных пластических деформаций вида $q_z = \alpha q_\theta$ ($\alpha - const$, феноменологический параметр). В результате решения краевой задачи компоненты тензора напряжений $\sigma_z(r)$, $\sigma_r(r)$ и пластических деформаций $q_i(r)$, $i = r, \theta, z$, в конечном итоге выражаются через компоненту $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$, параметр α , модуль Юнга и коэффициент Пуассона, где r – текущий радиус (диагональные компоненты тензоров напряжений и деформаций не рассматриваются). Таким образом, исходной информацией для решения задачи является экспериментальная диаграмма $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$. Выполнена проверка адекватности модели экспериментальным данным для компонент $\sigma_\theta(r)$, $\sigma_z(r)$, наблюдается соответствие расчетных и опытных данных.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект РНФ 19-19-00062).

Литература

1. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Вакулюк В. С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. – Самара : Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
2. Радченко В. П., Павлов В. Ф., Саушкин М. Н. Исследование влияния анизотропии поверхностного пластического упрочнения на распределение остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических образцах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 1. – С. 130–147. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.09.

3. Радченко В. П., Павлов В. Ф., Саушкин М. Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных втулках с учетом остаточных касательных напряжений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 138–150. – DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.12.

АНАЛИЗ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ АНИЗОГРИДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Шатов А. В., Буров А. Е., Лопатин А. В.

*Институт вычислительных технологий СО РАН,
б, пр-т Академика Лаврентьева, Новосибирск, 630090, Российская Федерация,
e-mail: aeburov@ict.nsc.ru*

В последнее десятилетие сетчатые цилиндрические оболочки, изготовленные из высокомолекулярных углепластиков, стали широко использоваться в качестве конструктивных элементов космических аппаратов. Уникальные свойства сетчатых цилиндрических оболочек позволяют использовать эти конструкции при создании новых видов космической техники. Примером может служить радиотелескоп, конструкция которого состоит из сетчатого цилиндрического корпуса и прикрепленного к его краям массивного оборудования. При создании радиотелескопа решаются многочисленные механические задачи, определяющие облик его конструктивных элементов. Среди них большой практический интерес представляет задача устойчивости нагретого сетчатого корпуса. Расчетной моделью этой задачи является сетчатая цилиндрическая оболочка, края которой жестко закреплены. Такой вид граничных условий обусловлен большими массами прикрепленного оборудования. Ребра оболочки подвергаются температурному воздействию.

Цель работы заключается в определении температуры, при которой сетчатый цилиндр теряет устойчивость. Для моделирования сетчатой оболочки, как пространственной рамы был использован балочный элемент пакета MSC Nastran. Расчеты критической температуры выполнены для оболочек с различным числом спиральных ребер и с различными углами наклона спиральных ребер

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60419X0233.

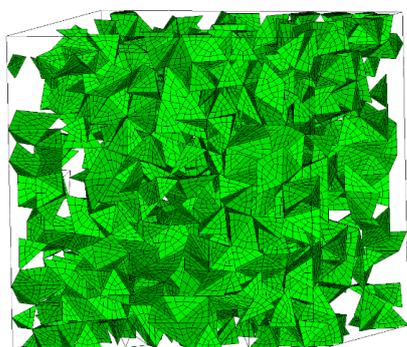
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ZTA-КОМПОЗИТА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Коробенков М. В.

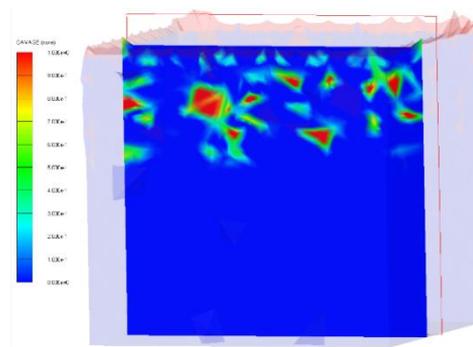
*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
14, Невского, Калининград, 236016, Российская Федерация,
e-mail: MKorobenkov@kantiana.ru*

Керамические композиты с трансформационным упрочнением широко используются в инженерной практике в качестве конструкционных материалов. Большинство таких материалов было разработано на основе диоксида циркония, частично стабилизированного в тетрагональной фазе. Под действием растягивающих напряжений в области микроконцентраторов тетрагональная фаза способна испытывать мартенситный фазовый переход в моноклинную фазу. Фазовый переход сопровождается диссипацией энергии и развитием сдвиговых и объемных деформаций, которые обеспечивают релаксацию напряжений и замыкание краев трещин. Эксперименты, проведенные в условиях статических нагрузок, показывают высокие показатели прочностных характеристик и трещиностойкости функциональных композитов [1]. Однако описание механического поведения подобных композитов в условиях динамических нагрузок мало исследованы и представляют серьезную проблему. Это в основном связано с недостаточными знаниями процессов эволюции структуры во фронте волны разрежения и отсутствием адекватных моделей механического поведения, позволяющего учесть особенности хода деформации, фазовых превращений, развития и накопления повреждений.

Представленная в физико-математическая модель, разработанная в рамках подхода вычислительной механики материалов, является продолжением работ по изучению динамической стойкости композитов [2]. Модель предназначена для изучения закономерностей деформирования и разрушения керамических композитов с трансформируемой матрицей на мезоскопическом и макроскопическом уровнях при интенсивном динамическом нагружении. Показано влияние скорости нагружения на формирование фронтов разрушения и рассеяния энергии для ZTA-композита. Нелинейные эффекты при интенсивных динамических эффектах в рассматриваемых композитах связаны с процессами самоорганизации структурных фрагментов на мезоскопическом уровне, а также с возникновением мартенситных фазовых превращений в объемах матрицы, прилегающих к упрочняющим частицам. На рисунке *а* изображена представительная расчетная ячейка с выделенными включениями диоксида циркония. На рисунке *б* представлено распределение накопленных повреждений в модельной структуре.



а



б

Репрезентативная расчетная ячейка с включениями диоксида циркония (*а*) и накопленные повреждения в модельной структуре в момент времени 0,05 нс (*б*)

Исследование было поддержано из средств субсидии, выделенной на реализацию Программы повышения конкурентоспособности БФУ им. И. Канта.

Литература

1. Исследование свойств керамического композита $ZrO_2(MgO)-Al_2O_3$ в широком диапазоне температур / М. В. Коробенков, Р. В. Левков, А. О. Товпинец, В. Н. Лейцин, С. Н. Кульков // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики–2017 : материалы VII молодежной научной конференции. – 2017. – С. 123–125.
2. Коробенков М. В., Левков Р. В. Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : материалы VI молодежной научной конференции. – 2016. – С. 56–57.

ПРОБЛЕМА РАЗНОТОЛЩИННОСТИ В ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ

Круглов А. А.¹, Лутфуллин Р. Я.¹, Мурзина Г. Р.², Еникеев Ф. У.²

¹*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН,
39, ул. Ст. Халтурина, 450001, Уфа, Российская Федерация,
e-mail: alexform1960@mail.ru*

²*Уфимский государственный нефтяной технический университет,
1, ул. Космонавтов, 450062, Уфа, Российская Федерация,
e-mail: kobros@yandex.ru*

Полусферические оболочки из титановых сплавов используют в летательных аппаратах. Также они являются составной частью сферических сосудов высокого давления, поэтому к ним предъявляют жесткие требования по обеспечению эксплуатационных характеристик и высокой надежности. По традиционной технологии сосуды высокого давления изготавливают из двух полусферических оболочек с помощью сварки. Качество сосудов во многом определяется геометрическими параметрами, среди которых следует особо выделить величину разнотолщинности стенки полусферической оболочки. Ранее, когда полусферические оболочки получали механической обработкой штамповки, разнотолщинность отсутствовала. В настоящее время ведущими производителями аэрокосмической техники для получения оболочек используют метод сверхпластической формовки (СПФ) – формообразование полого изделия за счет действия газостатического давления в условиях сверхпластичности. Однако все преимущества метода СПФ сводит на нет проблема разнотолщинности. Так, разнотолщинность стенки в меридиональном сечении полусферы из титанового сплава ВТ6 составляет 50–60 %.

Появление разнотолщинности связано с тем, что при СПФ деформация происходит исключительно за счет утонения свободной части заготовки без перемещения фланца, как это имеет место при вытяжке. Указанная проблема не является непреодолимой. Существует ряд методов, позволяющих уменьшить разнотолщинность.

В отечественном производстве сосудов высокого давления для изготовления полусферических оболочек применяют двухоперационную формовку с реверсом. Такая технология позволяет снизить разнотолщинность до уровня 14 % [1]. За рубежом, например для изготовления топливных баков ракеты Ariane 5 [2], используют исходную заготовку переменной толщины, а это уже кардинально уменьшает разнотолщинность. Следует отметить, что доступные научные публикации об использовании профилированных заготовок принадлежат зарубежным авторам.

В представленной работе сделана попытка ликвидировать данный пробел, и ее цель – выявить и изучить факторы, которые влияют на разнотолщинность полусферической оболочки, полученной методом СПФ из профилированной заготовки.

Моделирование процесса СПФ полусферических оболочек проводили с помощью программных комплексов DEFORM и ANSYS. Рассматривалось влияние на разнотолщинность оболочек следующих факторов: исходный профиль заготовки, величина входного радиуса матрицы, условия трения на контакте «лист–матрица». Установлено, что важную роль играет входной радиус, величина которого должна в несколько раз превышать минимальную толщину исходного профиля. Показано, что в отличие от случая формовки заготовок постоянной толщины силы контактного трения наоборот приводят к снижению разнотолщинности.

Литература

1. Кирьянова М. Н., Панченко Е. В. Уменьшение разнотолщинности стенки при сверхпластической формовке крупногабаритных полусферических оболочек // КШП. ОМД. – 2019. – № 1. – С. 13–15.
2. Beck W., Duon L., Rogal H. Titan 6–4 hemispheres for SCA system of Ariane 5 // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2008. – Vol. 39 (4–5). – P. 293–297.

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ

Сметанников О. Ю., Сахабутдинова Л. Р.

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

Повсеместное применение композиционных материалов актуализирует потребность в разработке новых численных моделей, позволяющих описывать их термомеханическое поведение. В работе предложены несколько новых подходов к конечно-элементному моделированию ключевых технологических этапов изготовления тонкостенной оболочки вращения, получаемой методом непрерывной намотки высокомодульной ленты на формообразующую оправку. Композиционный материал оболочки обладает анизотропией свойств, кроме того, формообразующая оправка представляет собой песчано-полимерную смесь с ярко выраженным терморологическим поведением.

Процесс изготовления оболочки осуществляется в два этапа: намотка высокомодульных лент на формообразующую оправку и полимеризация связующей матрицы оболочки в печи.

При численном моделировании процесса изготовления первоначально решается проблема определения эффективных вязкоупругих характеристик для оболочки. Вязкоупругие характеристики определены на основе разработанной комплексной экспериментально-расчетной методики, основанной на решении краевых квазистатических задач термомеханики на представительном объеме в двух масштабных уровнях. Исходя из особенностей армирования, материал оболочки на макроуровне конструкции принято считать ортотропным.

Моделирование технологического процесса изготовления осуществляется в три последовательных этапа. На первом этапе определяются усилия, возникающие в конструкции при натяжении высокомодульных лент на формообразующую оправку. На втором этапе решается нестационарная задача теплопроводности для определения распределения температурных полей конструкции «оправка–оболочка» в процессе полимеризации. Третий этап реализуется в несколько шагов. На первом шаге задается ранее определенное начальное напряженное состояние в оболочке, возникающее от усилия натяжения ленты в процессе намотки. Затем проводится расчет релаксации напряжений в течение времени, соответствующего процессу намотки.

Последующее решение проводится в цикле, в котором для каждого момента времени подгружается соответствующее решение задачи нестационарной теплопроводности в качестве объемной нагрузки и проводится расчет по определению напряженно-деформированного состояния конструкции.

Полученные в работе результаты, основанные на экспериментальных данных и предложенных приемах конечно-элементного моделирования, позволяют оценить вклад релаксации напряжений в оправке и оболочке на эволюцию напряженно-деформированного состояния в процессе термообработки изделия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-08-00903).

Литература

1. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М. : Машиностроение, 1988. – 272 с.
2. Советова Ю. В., Сидоренко Ю. Н., Скрипняк В. А. Многоуровневый подход к исследованию влияния объемного соотношения компонентов волокнистого однонаправленного углепластика на его механические характеристики // Вестник ТГУ. – 2014. – № 2 (28). – С. 77–89.

3. Шепери Р. А. Вязкоупругое поведение композиционных материалов // Механика композиционных материалов. Т. 2. – М. : Мир, 1978. – С. 102–195.
4. Ильюшин А. А., Победря Б. Е. Основы математической теории термовязкоупругости. – М. : Наука, 1970. – 280 с.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
СПЛОШНЫХ И ОБЪЕМНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ
СТАЛИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ,
В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ 10^2 – 10^3 С⁻¹**

Гармашев А. Ю., Смирнов Е. Б., Петухов Е.А., Кленов А. И., Сидоров К. С.,
Шестириков М. А., Юсупов Д. Т., Завьялов З. И., Борцов А. А.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,
д. 13, ул. Васильева, г. Снежинск, 456770, Российская Федерация,
e-mail: snzmario@hotmail.com*

В настоящей работе представлены результаты исследований динамических свойств образцов нержавеющей стали, полученных с помощью аддитивной технологии – методом 3D-печати. Исследовались образцы как со сплошной однородной, так и с объемно-периодической структурой. Эксперименты по нагружению проведены на установке метода составных стержней Гопкинсона (ССГ). Метод ССГ позволяет проводить испытания широкого круга материалов, исследовать динамические диаграммы сжатия и растяжения в диапазоне скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 10^2$ – 10^3 с⁻¹.

Цель работы – исследование ударно-волновых свойств образцов, изготовленных по методу аддитивных технологий.

Задача: получение и анализ экспериментальных результатов, полученных в результате проведения серии экспериментов на установке ССГ с 3D-образцами нержавеющей стали, имеющими сплошную и объемно-периодическую структуру.

Образцы из нержавеющей стали (аналог 12X18H10T), как сплошные, так и объемно-периодические, были изготовлены методом лазерного спекания металлического порошка (Selective Laser Sintering) на промышленном 3D-принтере.

В ходе исследований проведено более 50 экспериментов с образцами из нержавеющей стали. В работе получены диаграммы *напряжение-деформация* и скорость *деформации–деформация* в диапазоне скоростей ударника от 7 до 14 м/с, при этом собственные скорости деформации образцов составили от $0,75 \times 10^3$ до $2,8 \times 10^3$ 1/с. Проведен сравнительный анализ результатов исследования образцов, изготовленных с помощью аддитивных технологий, с данными стали, изготовленной традиционным способом, представлены направления дальнейших исследований.

О ВЛИЯНИИ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКНА ТИПА PANDA

Лесникова Ю. И., Труфанов А. Н.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: ulesig@gmail.com*

Оптические гироскопы являются ответственными элементами навигационных систем, к ним предъявляются жесткие требования по корректной работе в эксплуатационном диапазоне температур от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$. При этом в качестве чувствительного элемента широко используется анизотропное оптическое волокно типа Panda. Известно [1, 2], что оптические характеристики волокон тесно связаны с напряженно-деформированным состоянием (НДС) внутри светопроводящей жилы. При работе в широком диапазоне температур возникает сложное, изменяющееся во времени НДС оптического волокна, что в результате оказывает влияние на показатель преломления кварцевого волновода и оптический сигнал.

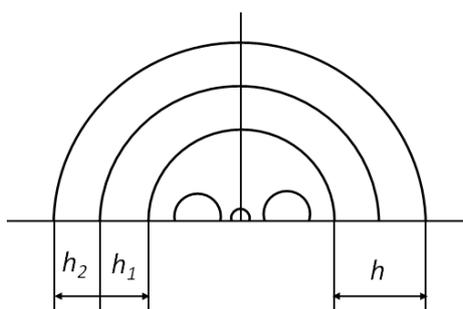


Рис. 1. Поперечное сечение оптического волокна типа Panda: h_1 – толщина внутреннего ЗУП; h_2 – толщина внешнего ЗУП; h – толщина ЗУП

В работе рассматривается этап промежуточного испытания волокна после его изготовления – технологическая проба, в котором волокно типа Panda (рис. 1) в один ряд с усилием наматывают на алюминиевые катушки разного диаметра с целью оценить чувствительность волокна к внешним воздействиям в диапазоне температур от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Чем меньше радиус катушки, на которую намотано волокно, тем большее влияние оказывают условия технологической пробы на НДС и оптические характеристики в волокне. Поэтому для более яркой иллюстрации эффектов, возникающих в волокне, была выбрана катушка радиусом $R_{kat} = 5$ мм. В качестве варьируемых параметров были приняты толщины защитно-упрочняющих покрытий (ЗУП) h_1 и h_2 (рис. 1). За эталонные размеры приняты $h_1=25$ мкм и $h_2=18,5$ мкм.

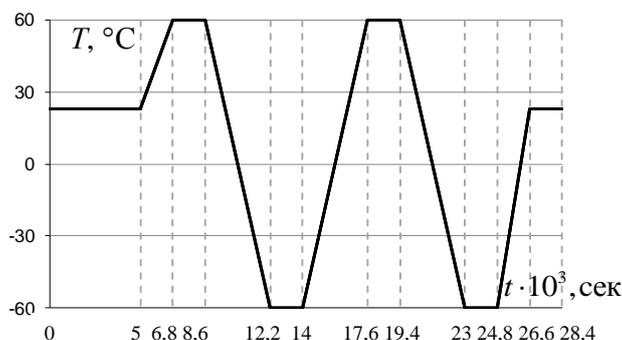


Рис. 2. Цикл изменения температуры

Была принята гипотеза, что температура изменяется равномерно по всему объему волокна и катушки, так как скорость изменения температуры в термоцикле мала. В результате были определены поля остаточных напряжений, получены зависимости компонент тензора технологических напряжений и контактного давления от времени, в условиях изменения температуры по термоциклу (рис. 2). Определены профили показателей преломления в центральном сечении светопроводящей жилы. Качественно профиль показателя преломления соответствует случаям, описанным в литературе [1].

Выполнено исследование влияния соотношения толщин ЗУП, на эволюцию показателя преломления во время термоцикла. Установлено, что с увеличением толщины мягкой буферной прослойки, в условиях термоцикла уровень контактных напряжений, а также уровень отклонений показателя преломления света, обусловленного НДС в светопроводящей жиле, снижается. Но в результате релаксации при увеличении толщины внутреннего ЗУП на графике появляются локальные пики в зонах нагрева и охлаждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 16-48-590660 p_a.

Литература

1. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. – М. : Наука, 1973. – 576 с.
2. Черненко В. Д. Оптомеханика волоконных световодов. – СПб. : Политехника, 2010. – 291 с.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОГО ПРИПОЯ ПО СЕРЕБРЯНОЙ ОСНОВЕ ПСр-72 ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Шестириков М. А., Юсупов Д. Т., Коваль А. В.,
Кадочников Д. Ю., Деменев А. С.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,
д. 13, ул. Васильева, г. Снежинск, 456770, Российская Федерация,
e-mail: Trix90@mail.ru*

Металл или сплав, заполняющий после расплавления зазоры между твердыми телами при соединении их методом пайки, называется припоем. С целью соединения различных деталей с помощью пайки разработано большое количество самых разнообразных припоев. В современном машиностроении число применяемых припоев весьма велико.

Исторически было принято подразделять припой на два основных класса:

- мягкие (обычно свинцово-оловянные);
- твердые (как правило, на медной, серебряной и золотой основах).

Совместно с элементами паянной конструкции материал припоя в условиях динамических нагрузок подвергается деформации и нагреву. Систематическая информация о свойствах и особенностях прочностного поведения твердых припоев практически отсутствует.

В настоящей работе были исследованы механические свойства припоя ПСр-72 по ГОСТ.

Цель работы – определение механических свойств твердого припоя при повышенных температурах.

Задачи:

- провести статистические эксперименты на растяжение образцов с получением диаграмм деформирования припоя ПСр-72 при заданных уровнях нагрева;
- определить значение прочностных и деформационных параметров испытываемого материала.

В результате проделанной работы получены диаграммы деформирования, по которым определены механические свойства образцов припоя марки ПСр-72 при заданных уровнях нагрева.

Пластичность припоя марки ПСр-72 не зависит от температуры испытаний.

Значение прочности припоя при комнатной температуре составляет $59,1 \text{ кгс/мм}^2$, при этом прочность припоя ПСр-72 незначительно зависит от температуры, снижение среднего значения прочности составило 19 %.

**ИЗУЧЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ
В ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ
ПОСРЕДСТВОМ РЕГИСТРАЦИИ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ И ПРОДОЛЬНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДВУМ НЕЗАВИСИМЫМ МЕТОДАМ ИЗМЕРЕНИЙ
В ПРЕГРАДЕ ИЗ МРАМОРА И ФТОРИДА ЛИТИЯ**

Юсупов Д. Т., Сидоров К. С., Кленов А. И., Широбоков А. Е.,
Комаров Р. В., Петровцев А. В., Шалковский Д. М.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,
д. 13, ул. Васильева, г. Снежинск, 456770, Российская Федерация,
e-mail: d.t.usupov@mail.ru*

Представлены постановка и результаты взрывных экспериментов с одновременной регистрацией сигналов от четырех низкоомных манганиновых датчиков и от трех лазерных интерферометрических измерителей скорости.

Цель работы – верификация результатов регистрации газодинамических процессов при совмещении двух независимых методик: многоканальной манганиновой (МД) и лазерно-интерферометрической на основе лазерного гетеродина (ЛГМ) и расчетного прогноза.

Задача – в дополнение к выполненным расчетам и проведенным ранее экспериментам получить результаты измерений профилей продольных напряжений $\sigma_{xx}(t)$ в реальном физическом процессе с реализацией двойного искусственного откола в ударнике из стали 12X18H10T, при этом измерить скорость $w(t)$ первой пластины и зарегистрировать профиль скорости границы 12X18H10T-оконный материал (LiF) при торможении на нем всего летящего каскада пластин.

Дано описание плосковолнового нагружающего устройства, методов регистрации – манганиновых датчиков (ММД) и лазерного гетеродина (ЛГМ), приведен состав и конструкция используемого механического узла (материал и количество ударников, их плотности и толщины, путь полета, материал, плотность и толщины деталей мишени).

Стальная (12X18H10T) пластина-ударник состояла из трех прижатых друг к другу слоев, толщиной (в порядке соударения с мишенью) соответственно 1 мм, 1 мм и 4 мм, имитирующих первый и второй естественные отколы в пластине с исходной суммарной толщиной 6 мм.

В работе представлены зарегистрированные в эксперименте сигналы от четырех манганиновых датчиков в координатах напряжение–время $\sigma_{xx}(t)$. Показаны результаты лазерно-интерферометрических измерений скорости $w(t)$ первой тонкой откольной пластины и профиль зависимости скорости границы сталь-LiF от времени. Реализована, предсказанная расчетом, трехволновая конфигурация ударной волны в мраморной преграде.

В экспериментах в представленной постановке можно с достаточным разрешением регистрировать не только макро повреждения (с полным расхождением откольных слоев), но и оценить поврежденность в неразрушенном ударнике.

Результаты измерений двух независимых методик в деталях согласуются с расчетным прогнозом, а также между собой.

АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Столбовский А. В., Фалахутдинов Р. М., Мурзинова С. А., Истомина А. Ю.

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
18, ул. С. Ковалевской, 620108, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: stolbovsky@imp.uran.ru*

Наноструктурные и субмикроструктурные объемные металлические материалы, полученные различными способами интенсивной пластической деформации (ИПД) привлекают большое внимание исследователей благодаря своему необычному механическому поведению и уникальной структуре и свойствам [1]. Среди наиболее популярных способов ИПД особое место занимает способ кручения под высоким давлением (КВД), который при комнатной температуре позволяет получать близкую к нанокристаллической структуре в чистых металлах [2]. Однако одной из важнейших проблем в создании наноструктурированных материалов с особыми свойствами является низкая термическая стабильность получаемых структур, особенно в чистых металлах. Поэтому перспективным является переход от чистых металлов к сплавам на их основе. Так, легирование меди оловом позволяет получить наноструктуру с большей термической стабильностью [3].

Новые подходы [4, 5], основанные на применении методов математической статистики, предоставили возможность проводить глубокий анализ зеренной структуры с выделением особенностей ее формирования при деформации и ее эволюции при дальнейшем отжиге.

В настоящей работе с помощью статистических методов [4, 5] была изучена зеренная структура в оловянистой бронзе состава Cu–7,4 % Sn, формирующаяся после деформации методом КВД на 1 и 5 об. при комнатной температуре и ее эволюция после последующих отжигов в течение 1 ч при температурах 200, 250 и 300 °С [3].

Установлено, что после деформации в структуре как после 1, так и 5 об. КВД формируются две группы кристаллитов (группа 1 и группа 2) с различной склонностью к протеканию релаксационных процессов при дальнейшем нагреве. При этом соотношение объемных долей этих групп различно для образцов исследованных образцов. Так, после 5 об. КВД доля группы 1 составляет 97 %, в то время как после 1 об. доля данной группы достигает только 76 %. Однако при нагреве объемная доля этой группы начинает снижаться вплоть до полного исчезновения при отжиге на 300 °С. Объемная доля группы 2 при нагреве постепенно возрастает и становится доминирующей для обоих образцов при 250 °С. При 300 °С для обоих образцов наблюдается появление новой группы кристаллитов (группа 3). Особенностью данной группы является значительно больший средний размер зерна и низкая дефектность внутреннего строения зерен [3]. Объемная доля группы 3 при 300 °С становится доминирующей и составляет 86 % для образца после КВД на 5 об. и 80 % для 1 об. КВД. Таким образом, при схожем характере эволюции и одинаковых общих параметрах структуры [3] протекание релаксационных процессов для образцов с различной величиной деформации не является одинаковым что приводит к формированию зеренной структуры с различающимися характеристиками.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Функция» № г/р АААА-А19-119012990095-0 при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 18-10-2-37).

Литература

1. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta Mater. – 2000. – Vol. 48 (1). – P. 1–29.
2. Valiev R. Z. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties // Nature Mater. – 2004. – Vol. 3. – P. 511–516. – DOI: 10.1038/nmat1180.

3. Stolbovsky A. V., Popov V. V., Popova E. N. Structure and thermal stability of tin bronze nanostructured by high pressure torsion // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – Iss. 5. – P. 118–132. – URL: http://dream-journal.org/issues/2015-5/2015-5_52.html (accessed: 16.06.2020).
4. Stolbovsky A. V. Advanced Statistical Analysis of Grain Structure in Single-Phase Materials Nanostructured by High-Pressure Torsion // *Solid State Phenomena*. – 2020. – Vol. 299. – P. 376–380.
5. Specific features of grain structure evolution in HPT-nanostructured tin bronze under subsequent heating / A. V. Stolbovsky, V. V. Popov, R. M. Falakhutdinov, S. A. Murzinova / *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2019. – Iss. 6. – P. 37–47. – URL: http://dream-journal.org/issues/2019-6/2019-6_280.html (accessed: 16.06.2020).

STUDING THE CAUSES FOR THE DESTRUCTION OF SHUTOFF EQUIPMENT IN WATER SUPPLY SYSTEMS ON UPPER FLOORS OF HIGH-RISE APARTMENT BUILDINGS

Antimonov A. M.¹, Pushkareva N. B.²

¹*Department of Mechanical Engineering, Ural Federal University, Institute of New Materials and Technologies, Mira Street 19, 620002 Ekaterinburg, Russia*

²*Department of Physics, Ural Federal University, Institute of Fundamental Education, Mira Street 19, 620002, Ekaterinburg, Russia*

The problem of the destruction of shutoff equipment in water supply systems on the upper floors of high-rise buildings is being solved. Studying the quality of products after destruction did not reveal defects of a metallographic nature or rejects in manufacture. Therefore, the hypothesis that the destruction cause is low-cycle material fatigue under the influence of dynamic loads, arising due to temperature deformations in the pipeline, was proposed. In this paper, we consider a pipeline scheme in which a temperature gradient appears in the fluid flow direction. At different temperature-induced strains of the pipeline parts, bending stresses emerge. The cyclic nature of the stresses is determined by the hot and cold water consumption periodicity. The pipeline model where the shutoff equipment has been installed is a beam with pinched ends. The bending stresses for this beam were calculated with the use of the initial parameter method. Plots of moments and transverse forces in the beam section were plotted. Allowable stress under dynamic loading was calculated. The size of the pipeline portion where shutoff equipment can be installed without destruction was determined.

The work was financially supported by RFBR grant No 16-08-01077.

References

1. Terent'ev V. F. and Korableva S. A. Uсталost' metallov [Metal fatigue]. Moscow : Nauka Publ., 2015. – 479 p.
2. N. Lautrou, D. Thevenet, Cognard J.-Y. Fatigue crack initiation life estimation in a steel welded joint by the use of a two-scale damage model // J .Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2009. – Vol. 32 (5). – P. 403–417.
3. Suresh S. Fatigue of Materials. – 2nd. ed. – Cambridge University Press, 2003. – 679 p.
4. Bathias S. Gigacycle fatigue in mechanical practice. – Magsel Dekker, 2005. – 304 p.
5. Svetlickiy V. A., Narajkin O. S. Problemy prikladnoj mehaniki, dinamiki i prochnosti mashin : sbornik statej [Problems of applied mechanics, dynamics and strength of machines: collection of articles]. – Moscow : Izd-vo MGTU, 2005. – 315 p.
6. Collins G. Povrezhdenie materialov v konstrukciyakh. Analiz, predskazanie, predotvrashchenie [Damage to materials in structures. Analysis, prediction, prevention]. – Mir Publ., 1984. – 624 p.
7. Troshchenko V.T. Prochnost' materialov i konstrukciy. T. 2. Uсталost' metallov [Strength of materials and structures. Vol. 2. Fatigue of metals]. – K. : In-t problem Prochnosti Publ., 2009. – 664 p.
8. Pisarenko G. S., Jakovlev A. P., Matveev V. V. Spravochnik po soprotivleniju materialov [Handbook of materials resistance]. – izd. 2-e, pererab. – Kiev : Naukova Dumka Publ., 1988. – 736 p.
9. Belyaev N. M. Soprotivlenie materialov : ucheb. posobie [Resistance of materials: Tutorial]. – M. : Alyans Publ., 2014. – 607 p.

НОВЫЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ ХРОМО-МАРГАНЦЕВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Ляшков К. А.¹, Шабашов В. А.², Козлов К. А.², Заматовский А. Е.², Катаева Н. В.²

¹Институт машиноведения УрО РАН,

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

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,

д. 18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация,

e-mail: lyashkov@imp.uran.ru

В связи с потребностью в экономно легированных сталях аустенитного класса перспективными являются разработки высокоазотистых сталей и композитов. Актуальность этих сталей обусловлена необходимостью снижения концентрации никеля или его замена на марганец [1]. В современной технологии производства сталей, сплавов и композиционных материалов с улучшенными функциональными свойствами активно привлекаются методы механосинтеза как альтернатива традиционной металлургии. В работах [2–3] предложены новые подходы по созданию дисперсно-упрочненных сталей с растворением малоустойчивых при интенсивной пластической деформации нитридов в матрицах сплавов с формированием вторичных упрочняющих наноразмерных фаз.

Цель настоящей работы – исследование структурно-фазовых переходов в смесях порошков малолегированных сплавов железа с нитридами CrN и Mn₂N, механически активируемых в шаровой мельнице.

В качестве исследуемых материалов использованы матрицы сплавов Fe-xCr ($x = 5, 7, 9, 15$) и Fe-xMn ($x = 4, 7, 9, 10$). Механосинтез (МС) осуществлялся в планетарной шаровой мельнице «Pulverisette-7» в атмосфере аргона. После МС полученные сплавы подвергались температурным отжигам в интервале температур 500–800 °С с различными временами выдержки.

Методом трансмиссионной мессбауэровской спектроскопии и трансмиссионной электронной микроскопии установлено, что при механоактивации в смесях порошков сплавов Fe-xCr + Mn₂N и Fe-xMn + CrN происходит формирование ОЦК и ГЦК твердых растворов Fe-Mn-Cr-N. Количество вновь образованного азотистого аустенита возрастает с увеличением содержания марганца в исходной матрице сплавов и количества нитридсодержащей добавки.

Специфика синтеза сплавов Fe-Mn-Cr-N заключается в активном участии процессов распада твердых растворов. Температурные отжиги в интервале температур 500–800 °С механически синтезированных порошков приводят к диффузионно-контролируемому переходу с формированием наноструктурированного дисперсно-упрочненного аустенита.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60006.

Литература

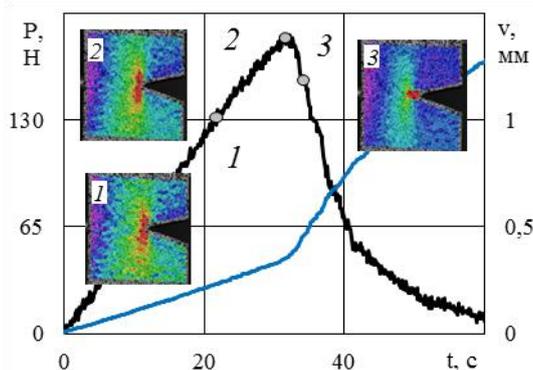
1. Лякишев Н. П., Банных О. А. Новые конструкционные стали со сверхравновесным содержанием азота // Перспективные материалы. – 1995. – № 1. – С. 73–82.
2. Mechanomaking of nanostructure in nitrided Fe-Cr alloys by cyclic «dissolution-precipitation» deformation-induced transformations / V. A. Shabashov, S. V. Borisov, A. V. Litvinov, A. E. Zamatovsky, K. A. Lyashkov, V. V. Sagaradze, N. F. Vildanova // High Pressure Research. – 2013. – Vol. 33. – P. 795–812.
3. Mossbauer analysis of deformation dissolution of the products of cellular decomposition in high-nitrogen chromium manganese austenite steel / V. A. Shabashov, L. G. Korshunov, V. V. Sagaradze, N. V. Kataeva, A. E. Zamatovsky, A. V. Litvinov, K. A. Lyashkov // Philosophical Magazine. – 2014. – Vol. 94 (7). – P. 668–682.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В КОМПОЗИТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Третьякова Т. В., Третьяков М. П., Зубова Е. М.

Центр экспериментальной механики ПНИПУ,
д. 15, ул. Ак. Королева, г. Пермь, 614000, Российская Федерация,
e-mail: cem.tretyakova@gmail.com; cem_tretyakov@mail.ru; cem.zubova@mail.ru

Совершенствование методов решения задач конструкционной прочности и безопасности ответственных конструкций с целью прогнозирования и уменьшения последствий техногенных катастроф на основе комплексного исследования закономерностей закритической стадии деформирования материалов [1] и соответствующего развития методов прочностного анализа не теряет своей актуальности в условиях постоянного развития и усложнения технических объектов и широкого использования современных конструкционных, а также композиционных материалов. Макроразрушению структурно-неоднородных тел предшествует сложный процесс потери несущей способности элементов структуры, сопровождаемый перераспределением напряжений и деформаций, в результате чего равновесный процесс накопления повреждений может перерасти в лавинообразный, привести к образованию макротрещины и к потере несущей способности конструкции [2].



Зависимость нагрузки раскрытия трещины от времени
и поля продольных деформаций

Проведено экспериментальное исследование закономерностей неупругого деформирования и процессов развития дефектов в телах с трещинами и трещиноподобными вырезами с использованием метода корреляции цифровых изображений, инфракрасной термографии и акустической эмиссии [3, 4]. Реализованы испытания на внецентренное растяжение образцов стеклопластика с V-образным надрезом, выполненных из полос тканого стеклопластика (перпендикулярно и вдоль направления армирования). На рисунке представлено изменение величины раскрытия трещины (v) в зависимости от времени в соответствии с процессом нагружения и эволюцией полей продольных деформаций.

На основе анализа эволюции температурных полей в процессе нагружения компактных образцов отмечен скачкообразный характер развития трещины в материале. Получены данные о развитии неоднородных полей деформаций, иллюстрирующие закономерности инициирования и равновесного развития трещин. Проведен анализ параметров сигналов АЭ (энергетического параметра, частоты спектрального максимума), позволивший идентифицировать несколько диапазонов частот сигналов, что может быть связано с изменением механизмов инициирования дефектов и накопления повреждений в стеклопластике в процессе деформирования и разрушения.

Работа выполнена в ЦЭМ ПНИПУ при финансовой поддержке РФФ (№ 16-19-00069).

Литература

1. Экспериментальные исследования закритического деформирования и разрушения конструкционных материалов / В. Э. Вильдеман, Е. В. Ломакин, М. П. Третьяков, Т. В. Третьякова, Д. С. Лобанов. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2018. – 156 с. – ISBN 978-5-398-02104-2.
2. Третьяков М. П., Третьякова Т. В., Зубова Е. М. Экспериментальное исследование процессов развития дефектов в композиционных материалах с трещиноподобными вырезами // Материалы XXVIII Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках», Пермь, 2–5 октября 2019. – 2019. – С. 103.
3. Комплексный анализ механического поведения и процессов разрушения образцов пространственно-армированного углепластика в испытаниях на растяжение / Т. В. Третьякова, А. Н. Душко, Е. М. Струнгарь, Е. М. Зубова, Д. С. Лобанов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – № 1. – С. 173–183.
4. Zubova E. M., Tretyakova T. V., Wildemann V. E. Application the acoustic emission technique to investigation of damage initiation in composites // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 18. – P. 843–848.

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СРЕД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

Панфилов П. Е.¹, Панфилов Г. П.¹, Зайцев Д. В.^{1,2}, Кисеев В. М.¹

¹*Институт естественных наук и математики, УрФУ,
51, пр. Ленина, Екатеринбург, 620000, Российская Федерация,
e-mail: peter.panfilov@urfu.ru*

²*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
18, ул. Академическая, Екатеринбург, Российская Федерация*

Металлические капиллярно-пористые среды используются в контурных тепловых трубах (КТТ) в качестве капиллярных насосов для транспорта жидкого теплоносителя. В работе изучается деформационное поведение при сжатии образцов таких материалов, полученных изостатическим прессованием порошков титана и никеля с последующим спеканием в вакууме. Интегральная пористость образцов была не ниже 60 %, при среднем радиусе пор для титана – 4,5 мкм, а для никеля – 0,5 мкм. Образцы для испытаний имели форму цилиндров диаметром 3 мм и высотой 3 мм. Механические испытания по схеме одноосного сжатия при комнатной температуре проводили на воздухе, в водопроводной воде и в этиловом спирте на разрывной машине Shimadzu AG-50K XD (скорость перемещения траверсы 0,1 мм/мин). Испытание останавливали, когда на деформационной кривой возникал резкий изгиб, означающий появление в образце опасной трещины. Для каждого материала было испытано по три группы образцов по десять штук в каждой – по одной в каждой среде. Развитие трещин на поверхности образцов изучали при помощи оптического микроскопа.

Механические свойства пористого титана и пористого никеля при одноосном сжатии на воздухе, в водопроводной воде и в этиловом спирте

Металл	Упругий модуль E, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Деформация до разрушения δ , %
Воздух			
Ti	300	55	30
Ni	500	35	10
Водопроводная вода			
Ti	300	85	35
Ni	700	33	10
Этиловый спирт			
Ti	250	165	55
Ni	200	37	20

Результаты механических испытаний представлены в таблице. Как и следовало ожидать, пластичность никелевых образцов оказалась ниже пластичности титановых, поскольку металлы с ГЦК-решеткой упрочняются сильнее ГПУ-металлов. Испытания в воде качественно не изменили характера деформационного поведения материалов, а повышение предела прочности титановых образцов и упругого модуля никелевых можно связать с проникновением внутрь образцов воды. Не было выявлено и отличий в характере роста трещин: на воздухе и в воде в титане и никеле появление трещин на поверхности не приводило к немедленному распаду образцов на части. При испытании в этиловом спирте (одном из основных теплоносителей в КТТ) происходит заметная пластификация обоих материалов, выражающаяся в снижении упругого модуля и увеличении деформации до разрушения. При этом появление в образце трещины означает его практически мгновенное разрушение/диспергирование. Такое поведение можно связать с капиллярными эффектами, возникающими при проникновении этилового спирта в пористую структуру материалов.

Работа выполняется при поддержке РФФИ-СО (грант 20-48-660017).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Шимов Г. В., Бушуева Н. И.

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: g.v.shimov@urfu.ru

Моносимметричные профили, содержащие сравнительно тонкие полотна, нетехнологичны в большинстве известных схем из-за сложности правки готовых профилей в холодном состоянии. Анализ известных способов и выбор наиболее пригодной технологической схемы для мелкосерийного изготовления моносимметричного тонкостенного особо точного профиля из коррозионностойкой стали типа 18–10 выполнен для пластины (рис. 1). Цель работы – предложение рациональной технологии изготовления данной пластины в соответствии с требованиями НТД. Сложность изготовления пластины для элементов крепления тепловыделяющих сборок заключается в том, что пластина должна быть изготовлена из коррозионно-стойких жаропрочных сталей, склонных к интенсивному упрочнению типа 12–18. Сложность также увеличивают требования к точности размеров и форме пластины очень высоки.

В ходе компьютерного (DEFORM-3D) и физического моделирования оценивалась возможность получения готовой пластины соответствующим способом, а также накопленная степень деформации сдвига, поврежденность и запас пластичности металла в «опасной зоне».

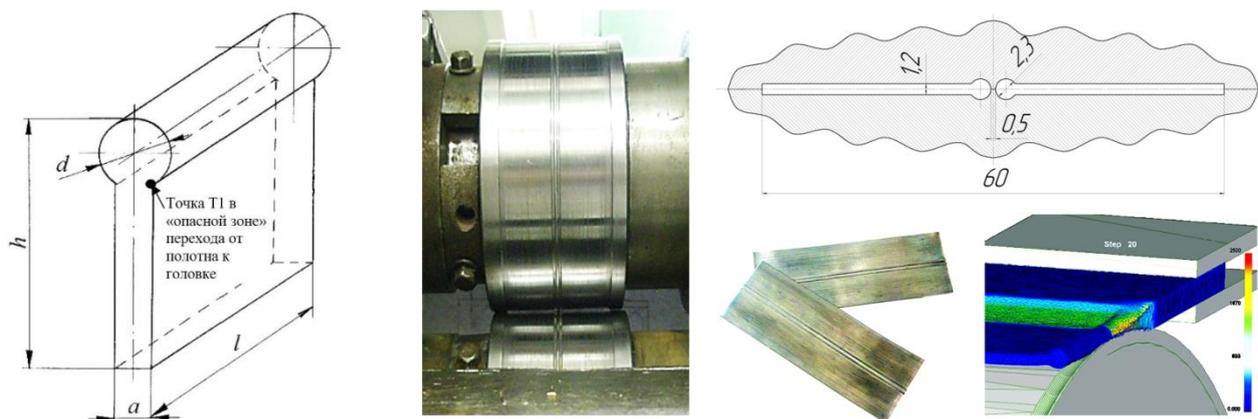


Рис. 1. Калибр и секторы для прокатки сдвоенной пластины и пластины, прокатанные на лабораторном стане

Компьютерное моделирование показало нецелесообразность изготовления профиля волочением и прессованием из-за асимметрии поперечного сечения. Возможность производства пластины прокаткой (рис. 1) и высадкой (рис. 2) проверялась физическим моделированием.

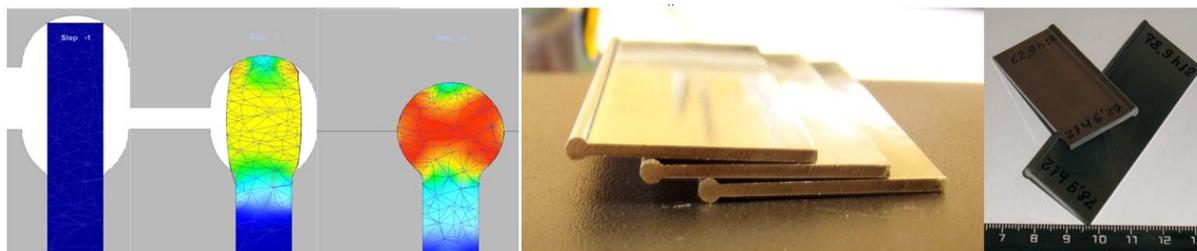


Рис. 2. Этапы высадки головки и пластины, изготовленные высадкой на винтовом прессе

Для анализа вероятности микро- и макроразрушения в «опасной зоне» применена феноменологическая модель накопления поврежденности.

Поврежденность металла в точке обладает свойством аддитивности ($\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i$) и в момент времени определяется по формуле

$$\omega = \int_0^{\Lambda} \frac{a \cdot \Lambda^{a-1}}{\Lambda_p^a} d\Lambda, \quad (1)$$

где a – функциональный коэффициент, характеризующий скорость накопления поврежденности металлом, зависящий от свойств металла; Λ_p – предельно допустимая степень деформации сдвига при данных показателях напряженного состояния σ/T и μ_σ .

Для оценки накопленной поврежденности в точке за n этапов деформирования можно применить рекуррентную формулу:

$$\omega_\Sigma = \left[\left[\left[\left(\frac{\Lambda_1}{\Lambda_{p1}} \right)^{\frac{a_1}{a_2}} + \frac{\Lambda_1}{\Lambda_{p1}} \right]^{\frac{a_2}{a_3}} + \dots + \frac{\Lambda_i}{\Lambda_{pi}} \right]^{\frac{a_i}{a_{i+1}}} + \dots + \frac{\Lambda_n}{\Lambda_{pn}} \right]^{a_n}. \quad (2)$$

Функциональный коэффициент a зависит от показателя σ/T и рассчитывается по формуле

$$a = a_0^{1+\alpha\sigma/T}, \quad (1)$$

где a_0 – коэффициент, зависящий от марки стали и соответствующий значению a при $\sigma/T = 0$; α – степенной коэффициент; $\alpha \approx 0,238$ для стали [1].

Коэффициент a_0 определяется экспериментально при испытаниях на знакопеременное кручение при различном давлении, для холоднокатаного листа из стали 12X18H10T $a_0 = 1,63$ [2].

Выводы. После прокатки запас пластичности в силу присутствия значительных растягивающих напряжений в «опасной зоне» относительно небольшой ($\Lambda_\Sigma = 1,92$ при $\sigma/T = 0,32$). Поврежденность в «опасной точке» после прокатки $\omega_\Sigma = 0,28$. Значение поврежденности 0,28 превышает первый критерий микро-разрушения ω^* (для стали 12X18H10T $\omega^* = 0,25$), что свидетельствует о вероятности появления микропор и микротрещин в «опасной зоне» [2].

После высадки запас пластичности в «опасной зоне» относительно большой ($\Lambda_\Sigma = 0,26$ при $\sigma/T = -0,77$). Это объясняется благоприятным напряженно-деформированным состоянием при осадке, которое не провоцирует рост растягивающих напряжений в «опасной зоне». Поврежденность в «опасной точке» после высадки $\omega_\Sigma = 0,029$, что значительно меньше первого критерия микро-разрушения ω^* . В очаге на протяжении практически всего цикла высадки имеет место благоприятное НДС, схема близка к схеме всестороннего сжатия, показатель $\sigma/T < 0$ и варьируется в диапазоне от $-0,77$ до $-1,09$.

Феноменологическая модель накопления поврежденности позволила оценить вероятность микро- и макроразрушения металла в «опасной зоне», а также ресурс пластичности для различных схем НДС.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания № 0836-2020-0020.

Литература

1. Богатов А. А. Трещиностойкость высокопрочной стали и разрушение магистрального газопровода // *Металлург.* – № 1. – 2017. – С. 70–74.
2. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2002. – 329 с.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ЛОПАТКАХ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Трофимов В. Н.¹, Пьянков И. Н.^{1,2}, Пьянков В. А.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: tvn_perm@mail.ru; pyankov.ivan@list.ru

²АО «ОДК-Пермские моторы»,
93, Комсомольский проспект, Пермь, 614010, Российская Федерация

Известно, что целью разработки и внедрения монокристаллических лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) послужило обеспечение работоспособности материала лопаток по критерию длительной прочности для более высокотемпературных двигателей или повышение ресурса по сравнению с поликристаллическими лопатками за счет повышения длительной прочности материала в том же температурном интервале. Рабочие лопатки турбин, являющиеся сложным объектом диагностирования [1].

В настоящее время для исключения пропуска лопаток турбины с горячими кристаллизационными трещинами на производстве введен серийный неразрушающий контроль (НК) макроструктуры перемычек ножки и хвостовика лопаток с учетом дополнительных требований по пересечению границами зерен специально оговоренных зон и введением максимального угла разориентации зерен не более 25°.

Анализ дефектности лопаток показал необходимость совершенствования технологического процесса НК лопаток с учетом их конструктивных особенностей и упругих свойств, в частности литого никелевого сплава ЖС32-ВИ. Существующий способ контроля лопаток на производстве не позволяет производить достоверный контроль. Таким образом, необходимо критически проанализировать имеющуюся методику контроля лопаток.

В работе [2] на рабочих лопатках газотурбинного двигателя (ГТД) в области перемычек с применением модельных образцов и штатных деталей был опробован метод контактной лазерно-ультразвуковой дефектоскопии [3] для решения актуальной технической задачи – своевременного выявления горячих кристаллизационных трещин, границ зерен и шлаковых засоров в рабочих лопатках турбин ГТД на стадии изготовления и после эксплуатации.

Весьма вероятно, что разработка новой методики определения горячих кристаллизационных трещин, границ зерен в специально оговоренных зонах с учетом дополнительных требований позволит прекратить необоснованную отбраковку фактически годных монокристаллических лопаток, тем самым повысить выход годной продукции и с другой стороны повысить достоверность контроля, тем самым прекратить выпуск лопаток, которые вероятно могут иметь кристаллизационные трещины и границы двух смежных зерен в специально оговоренных зонах с учетом дополнительных требований.

Литература

1. Киселев Ф. Д. Диагностика разрушений и оценка эксплуатационной работоспособности рабочих турбинных лопаток авиационных двигателей : монография. – М. : Издательство МАТИ, 2012. – 296 с.
2. Пьянков И. Н., Пьянков В. А. Акустические методы контроля лопаток газотурбинных двигателей // В мире неразрушающего контроля. – 2019. – Т. 22 (1). – С. 36–44. – DOI: 10.12737/article_5ca31f9ac25011.96368656.
3. Гусев В. Е., Карабутов А. А. Лазерная оптика. – М. : Наука, 1991. – 304 с.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБНОЙ СТАЛИ 08Г2Б ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Горкунов Э. С., Поволоцкая А. М., Задворкин С. М., Путилова Е. А.,
Мушников А. Н., Крючева К. Д.

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

Изучено влияние предварительного отнулевого циклического нагружения на различное количество циклов трубной стали 08Г2Б на закономерности поведения ряда ее магнитных характеристик в условиях упругого одноосного растяжения с целью выявления характера наведенной таким силовым воздействием магнитной анизотропии и определения параметров, применимых для оценки действующих упругих деформаций металла конструкций, подвергнутых ранее циклическим нагрузкам.

Объектом исследования служили плоские образцы с головками, вырезанные вдоль направления прокатки из прямошовной трубы, изготовленной из трубной стали 08Г2Б. Образцы на первом этапе исследований подвергали циклическим испытаниям по схеме отнулевого растяжения с амплитудой 300 МПа, что немного выше значения условного предела текучести $y_{0,2}$, с частотой 3 Гц. Количество циклов варьировали. В результате были получены образцы после 0, 30, 50, 100 и 300 тысяч циклов. На втором этапе исследований предварительно циклически деформированные образцы подвергали упругому одноосному растяжению с одновременным измерением их магнитных характеристик, в том числе продольной магнитострикции. Измерения проводили как в замкнутой магнитной цепи, так и с использованием накладных преобразователей в полужамкнутой магнитной цепи.

Показано, что предыстория в виде предварительного циклического нагружения сказывается на закономерностях изменения магнитных параметров материала при его последующем упругом деформировании так же, как и предыстория в виде предварительной пластической деформации статическим растяжением. Это может быть обусловлено вносимыми циклическим нагружением остаточными напряжениями.

Установлено, что такие магнитные характеристики, как продольная коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, остаточная индукция и отношение обратимой магнитной проницаемости к начальной магнитной проницаемости в диапазоне растягивающих напряжений от 0 МПа до 100 МПа изменяются однозначно. При этом поперечная коэрцитивная сила демонстрирует монотонное возрастание в диапазоне от 100 МПа до 200 МПа. Это позволяет использовать совокупность указанных параметров для разработки методов оценки напряжений в диапазоне 0...200 МПа в изделиях из трубной стали 08Г2Б с учетом их предыстории. Показано также, что оценку действующих напряжений можно проводить по величине экстремумов на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости в области отрицательных полей и значениям напряженности магнитного поля, в которых они локализируются.

Исследования магнитострикции показали, что растягивающие напряжения, при которых происходит исчезновение положительного участка на полевой зависимости магнитострикции, практически совпадают со значениями напряжений, соответствующих экстремумам на зависимостях продольной коэрцитивной силы, максимальной магнитной проницаемости, остаточной индукции и отношения обратимой магнитной проницаемости к начальной магнитной проницаемости.

При выполнении настоящей работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00392_a.

The work was financially supported by RFBR grant No. 20-08-00392_a.

МЕХАНИЗМ РОСТА ТРЕЩИНЫ В ДЕНТИНЕ ЧЕЛОВЕКА ПРИ СЖАТИИ

Зайцев Д. В.^{1, 2}, Funk A.³, Waske A.³

¹Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
19, ул. Мира, Россия, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация,
e-mail: dmitry.zaytsev@urfu.ru

²Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук,
20, ул. Академическая, Екатеринбург, 620137, Российская Федерация,
e-mail: dmitry.zaytsev@urfu.ru

³Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung, Germany,
12205, Berlin, Unter den Eichen 87,
e-mail: alexander.funk@bam.de

Благодаря иерархической микроструктуре материалы биологического происхождения обладают высокими специализированными прочностными свойствами. Они состоят из органических и неорганических компонент, а количество структурных уровней, в некоторых случаях, может достигать семи. Понимание взаимосвязи между деформационным поведением и микроструктурой таких материалов позволит разработать новые композиционные материалы, обладающие высокими служебными характеристиками. Дентин зубов человека обладает способностью к высокой упругой и необратимой деформации при большом пределе прочности. Он способен выдерживать многократное нагружение несмотря на наличие в нем трещин. Предполагается, что в дентине перед вершиной трещины происходят интенсивные деформации. Цель работы – изучение роста трещины при одноосном сжатии. Образцы квадратного сечения подвергали одноосному сжатию на различную величину осадки/деформации (0–35 %). Выбранный интервал деформаций позволил оценить повреждения микроструктуры от момента зарождения трещин до начала распада образца на части. Изучение эволюции трещин было выполнено при помощи компьютерной микротомографии на 3D X-ray Microscopy by ZEISS Xradia 620 Versa. Все образцы были отсканированы при разрешении 1,7 мкм, тогда как области перед вершиной трещины сканировали с разрешением 0,4 мкм.

Из опытов следует, что трещины в образце появляются непосредственно перед достижением максимального напряжения – предела прочности. Следовательно, высокая упругая и необратимая деформация не связана с зарождением микротрещин, по крайней мере видимых при разрешении 1,7 мкм. После достижения предела прочности количество и длина трещин в образце возрастают. Детальное изучение области перед вершиной трещины при высоком разрешении показало, что там присутствуют микротрещины. До достижения предела прочности микротрещины лежат параллельно траектории основной трещины, обеспечивая ее рост. После предела прочности дополнительно появляются микротрещины, наклоненные под углом 60° к траектории основной трещины. Основная трещина может пересекать их, но они не являются ее продолжением. Поэтому можно заключить, что появление «наклоненных микротрещин» снижает энергию основной трещины и замедляет ее рост, что позволяет не распадаться образцу из дентина при многократном нагружении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 18-38-20097.

СПЕКТР ЧАСТОТ МИКРО- И НАНОРЕЗОНАТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМИ ОТ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ КРОМКАМИ

Хакимов А. Г.

*ИМех им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН,
71, пр-т Октября, Уфа, 450054, Российская Федерация,
e-mail: hakimov@anrb.ru*

Среди многочисленных видов применения микро- и нанопленок, нанопроволок, нанотрубок может быть указано также использование их в качестве детекторов и сенсоров в химии, биологии и т. д. В [1, 2] дается обзор статей, посвященных главным образом консольным резонаторам из нанопленок и нанопроволок. Определены собственные частоты изгибных колебаний резонатора с прямоугольным поперечным сечением. Учитывается поверхностный эффект, обусловленный взаимодействием давления газа и разности площадей выпуклой и вогнутой поверхностей резонатора. Эта разность возникает при деформации изгиба. Определяется спектр частот с учетом действия осевой силы, взаимодействия среднего давления и кривизны ее осевой линии по теориям балок Бернулли–Эйлера и Тимошенко (таблица).

Три низшие собственные частоты f_1, f_2 и f_3 для ненапряженных нанобалок

№ п/п	$b \times h$	Источник	Метод	f_1 (GHz)	f_2 (GH)	f_3 (GHz)
1	$4,08 \times 4,08 \text{ nm}^2$	[4]	MD	2,71–2,78	7,28–7,33	13,8–13,9
2		[3]	A_{B-E}	2,83	7,81	15,3
3		[3]	A_T	2,78	7,43	14,0
4		[5]	A_{B-E}	2,76	7,62	14,94
5		[5]	A_{T1}	2,75	7,50	14,44
6		[5]	$A_{T\psi}$	1,25	4,84	10,39
7		[5]	A_T	2,76	7,24	13,36

Молекулярная динамика MD – это результаты MD моделирования при температуре 4,2 К, A_{B-E} , A_T являются результатами расчетов балок Бернулли–Эйлера и Тимошенко. Первые три строчки взяты из [3], результаты MD из [4]. Расчеты проведены для следующих параметров системы [3]: модуль упругости $E = 39 \text{ GPa}$, модуль сдвига с учетом коэффициента $k G = 12,25 \text{ GPa}$; ширина сечения $b = 4,08 \text{ nm}$; высота $h = 4,08 \text{ nm}$; длина $L = 49 \text{ nm}$; плотность материала $\rho = 19\,300 \text{ kg/m}^3$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,44$, усилие натяжения $T = 0$, среднее давление $p_m = 0$. Результаты расчета по частотному уравнению для балки Бернулли–Эйлера приводятся в строке 4 (таблица). Учет поправки, обусловленной поворотом поперечных сечений при колебаниях [5], приводит к незначительному снижению частот колебаний (строка 5, таблица A_{T1}). Результаты расчета по частотному уравнению для балки Тимошенко приводятся в строках 6 (колебания, обусловленные сдвигом сечений $A_{T\psi}$) и 7 (колебания, обусловленные прогибом) таблицы (модуль упругости $E = 42 \text{ GPa}$, модуль сдвига с учетом коэффициента $k G = 24 \text{ GPa}$). Рассмотрено изменение спектра частот при наличии на поверхности резонатора присоединенной сосредоточенной и равномерно распределенной масс. Из решения обратной задачи определяется присоединенная масса по изменению собственных частот.

Литература

1. Raman A., Melcher J., Tung R. Cantilever dynamics in atomic force microscopy // Nano Today. – 2008. – Vol. 3 (1–2). – P. 20–27.
2. Nanomechanical Resonators and Their Applications in Biological/Chemical Detection: Nanomechanics Principles / K. Eom, H. S. Park, D. S. Yoon, K. Kwon // Phys. Rep. – 2011. – Vol. 503 (4–5). – P. 115–163.
3. Olsson P. A. T., Park H. S., and Lidström P. C. The Influence of shearing and rotary inertia on the resonant properties of gold nanowires // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 108 (3). – P. 104312.
4. Olsson P. A. T. Transverse resonant properties of strained gold nanowires // J. Appl. Phys. – 2010. – 108 (3). – P. 034318.
5. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. – Киев : Наукова думка, 1972. – 503 с.

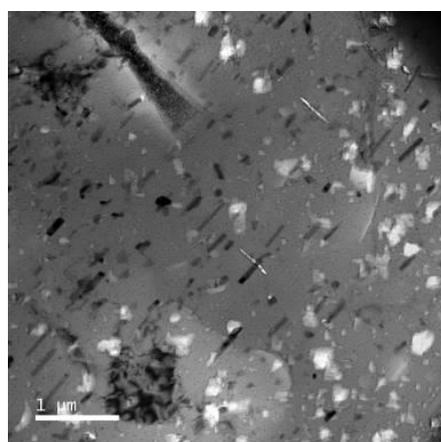
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА В95 В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Смирнов А. С.¹, Коновалов А. В.¹, Канакин В. С.^{1,2}

¹Институт машиноведения УрО РАН,
34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: smirnov@imach.uran.ru

²ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

Сплавы и композиционные материалы на их основе при высоких температурах формирования деталей методами обработки давлением обладают зависимостью реологического поведения от истории деформации. Это связано с неравновесными процессами упрочнения и разупрочнения протекающими в условиях термомеханического нагружения. Цель работы – верификация математической модели сопротивления деформации металлических материалов и композитов на их основе на примере сплава В95 после гетерогенизационного отжига.



Микроструктуры сплава В95 после гетерогенизационного отжига

В работе верификацию модели сопротивления деформации проводили на основе данных эволюции микроструктуры и реологического поведения гетерогенизированного сплава В95 (рисунок), который в результате распада твердого раствора приближен к микроструктуре металломатричных композитов. Исследование формирования микроструктуры и реологического поведения образцов из сплава В95 проходило в диапазоне температур 300–500 °С и скоростей деформаций 0,1–5 с⁻¹. Исследования формирования микроструктуры в процессе деформации проводили на резко охлажденных образцах в экспериментах на сжатие после достижения ими степени деформации, равной 0,65. Далее образцы разрезали вдоль оси нагружения, а затем анализировали сформированная микроструктура методом дифракции отраженных электронов и просвечивающей электронной микроскопией в трех областях образца: 1) в центре; 2) на боковой поверхности; 3) в зоне прилегающей к поверхности контакта образца и бойка. На основании этих данных было установлено, что в процессе деформации сплава В95 в зависимости от температуры происходит динамический возврат и может одновременно протекать прерывистая и непрерывная рекристаллизация. Наличие в исследуемом сплаве В95 дисперсных частиц тормозит движение свободных дислокаций и миграцию границ зерен. Кривые сопротивления деформации сплава В95 в исследуемых деформационно-скоростных условиях показали, что сплав обладает вязкими свойствами. Это проявляется в увеличении сопротивления деформации сплава с ростом скорости деформации. На основании этих положений для описания эволюции сопротивления деформации в зависимости от истории деформационно-термического воздействия на сплав была использована структурно-иерархическая вязкопластическая модель сопротивления деформации. Модель записана в виде системы диф-

ференциальных уравнений с переменными, описывающими формирование зерен, миграцию границ зерен, аннигиляцию и блокирование движения дислокаций частицами. Модель построена с точностью до пятнадцати неизвестных параметров, определяемых по результатам идентификации экспериментальных кривых сопротивления деформации. В модели присутствует допущение, что сплав В95 пластически несжимаемый, а пластические деформации подчиняются ассоциированному закону пластического течения Мизеса. Результаты верификации и идентификации модели показали, что максимальное относительное отклонение экспериментальных кривых и расчетных для всего температурно-скоростного диапазона испытаний не превышает 7,4 %, что является приемлемым для инженерных расчетов.

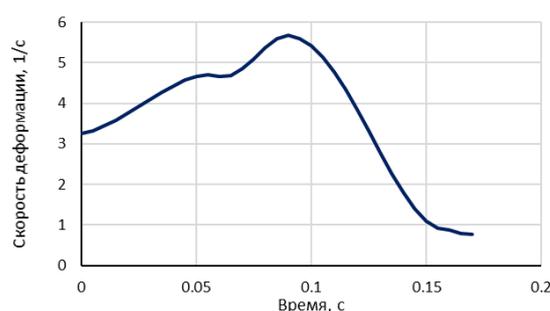
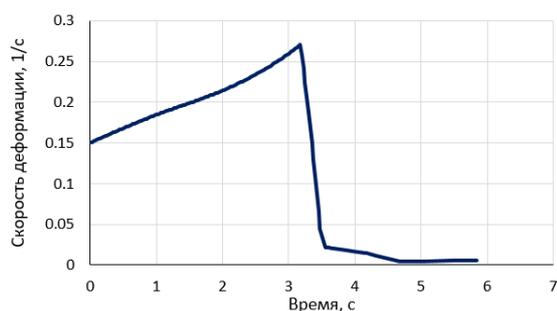
Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-08-00765.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА АМГ6/10 % SiC В УСЛОВИЯХ НЕМОНОТОННОГО НАГРУЖЕНИЯ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЕФОРМАЦИЙ

Смирнов А. С., Коновалов А. В.

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

Изготовление деталей конструкционного назначения из металломатричных композиционных материалов, как правило, проводится при повышенных температурах, что связано с относительно низкими пластическими свойствами композита. В условиях температур обработки давлением реологическое поведение металломатричных композиционных материалов зависит от истории термомеханического воздействия на композиционный материал, что связано с конкурирующими процессами упрочнения и разупрочнения. Поскольку современное проектирование изготовления деталей, в том числе и из металломатричных композитов, заключается в использовании компьютерного моделирования, то для корректного описания поведения заготовки в условиях деформационного воздействия необходимо, чтобы модель корректно описывала реологическое поведение рассматриваемого композита. Цель работы – верификация модели сопротивления деформации на основе данных реологического поведения металломатричного композита (ММК) АМГ6/10 % SiC в диапазоне температур 300–500 °С и скоростей деформаций 0,15–5 с⁻¹.



Примеры законов нагружения образцов, используемых при идентификации модели сопротивления деформации

Модель, используемая для описания реологического поведения ММК АМГ6/10 % SiC представляет собой структурно-иерархическую модель сопротивления деформации, описывающую вязкое и пластическое поведения материала. Модель построена из допущения, что моделируемый материал пластически несжимаемый, а пластические деформации подчиняются ассоциированному закону пластического течения Мизеса. Модель записана в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений с внутренними параметрами, описывающими вязкие свойства, упрочнение посредством увеличения плотности дислокаций и их блокирования на частицах, а также разупрочнение в результате динамического возврата и рекристаллизации. Модель построена с точностью до неизвестных коэффициентов, которые определялись из экспериментов на сжатие цилиндрических образцов в условиях немонотонного нагружения. Примеры законов нагружения образцов, использованных в экспериментах, приведены на рисунок. Как видно из данного рисунка, кривая нагружения образцов имеет участки возрастания и убывания скорости деформации. Полученные экспериментальные зависимости сопротивления деформации от скорости деформации были использованы для идентификации математической модели сопротивления деформации, которая проводилась одновременно по трем законам нагружения. После идентификации модели была проведена ее верификация и построены кривые сопротивления деформации при постоянных скоростях

деформаций. Верификация модели была проведена по законам нагружения не использованных при идентификации. Результаты верификации и идентификации показали, что среднее относительное отклонение экспериментальных от расчетных кривых сопротивления деформации не превысило 5,4 %, что является приемлемым для инженерных расчетов.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы Института машиноведения УрО РАН (проект № АААА-А18-118020790140-5) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант РФФИ № 19-08-00765.

ВЛИЯНИЕ МЕТОДИКИ ПРОБОПОДГОТОВКИ ПОРОШКА КАРБИДА ТИТАНА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Канакин В. С.^{1,2}, Смирнов А. С.¹

¹Институт Машиноведения УрО РАН,

34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: kanakin.v.s@gmail.com; valient83@yandex.ru

²ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

Металломатричные композиты (ММК) в сравнении с традиционными сплавами обладают более высокими механическими свойствами, характеристиками усталостного разрушения, теплопроводности, электропроводности и другими физическими и технологическими свойствами. Формирование физико-механических свойств в ММК зависит от условий синтеза, режимов термомеханического воздействия на ММК, а также от используемых при синтезе армирующих частиц, их содержания, формы и размера. С уменьшением фракции частиц увеличивается доля поверхности частиц по отношению к их объему, что приводит к увеличению вероятности конгломерации частиц. В результате возникает проблема, связанная с определением истинного размера частиц. Цель работы – определение истинного размера частиц и влияния поверхностно активных веществ (ПАВ) на разбиение конгломератов частиц на примере порошка из карбида титана (TiC).

Объектом исследования в работе был выбран порошок карбида титана, произведенный по карботермическому методу с разными фракциями TiC_1^c и TiC_2^c , а также карбид титана, полученный магнетермическим методом (TiC^m). Измерения размеров частиц проводились с помощью анализатора частиц ЛАСКА-ТД по методу дифракции лазерного излучения, основанному на измерении зависимости интенсивности рассеянного лазерного излучения от угла рассеяния. Измерение частиц проведено тремя способами: без ПАВ, с ПАВ № 1 и с ПАВ № 2. Анализ порошков TiC проводился при трех различных режимах пробоподготовки суспензии: 1) предварительная подготовка суспензии в воде без добавления ПАВ при интенсивном перемешивании 15 мин; 2) предварительная подготовка суспензии в воде с добавлением ПАВ № 1 при интенсивном перемешивании 15 мин; 3) предварительная подготовка суспензии в воде с добавлением ПАВ № 2 при интенсивном перемешивании 15 мин. ПАВ № 1 («Darvan») представляет собой специализированное средство, предназначенное непосредственно для снижения количества образованных конгломератов частиц. ПАВ № 2 – чистящее средство «FAIRY». Полученные результаты о регистрируемом среднем размере частиц приведены в таблице.

Средние значения измерений для каждого порошка в зависимости от режима

Режим	Размер частиц, мкм		
	TiC_1^c	TiC_2^c	TiC^m
Без ПАВ	$3,7 \pm 1,8$	$10,8 \pm 5,5$	$4,8 \pm 2,4$
ПАВ №1	$3,3 \pm 0,7$	$6,1 \pm 1,1$	$3,7 \pm 1,6$
ПАВ №2	$9,5 \pm 2,0$	$10,3 \pm 2,5$	$9,7 \pm 2,1$

Как видно из таблицы, применение ПАВ № 1 привело к уменьшению конгломератов частиц в суспензии, что выразилось в уменьшении среднего размера частиц и сужении доверительного интервала. Особенно эффективное уменьшение конгломератов с помощью ПАВ № 1 наблюдается для порошка карбида титана фракции TiC_2^c . Применение ПАВ № 2 не привело к получению удовлетворительных результатов (таблица). В результате, для снижения доли образовавшихся конгломератов можно рекомендовать ПАВ № 1.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-08-00765.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОДБИВКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО БАЛЛАСТА НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ПУТЕВЫХ МАШИН

Манаков А. Л., Игумнов А. А.

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
191, Дуси Ковальчук, Новосибирск, 630049, Российская Федерация,
e-mail: iaa@yandex.ru*

Для обеспечения плавного и безопасного движения поездов периодически требуется устанавливать рельсошпальную решетку в проектное положение и одновременно фиксировать ее уплотнением балластного слоя, т.е. производить подбивку. Качество подбивки балласта характеризуется степенью его уплотнения под шпалами, необходимой для закрепления рельсошпальной решетки и стабильного ее удержания в процессе дальнейшей эксплуатации. Результаты моделирования процесса формирования балластного слоя [1, 2] позволяют установить оптимальные значения степени уплотнения балласта. При уплотнении слоя балласта толщиной H необходимая и достаточная степень уплотнения балласта обеспечена, если относительная осадка слоя $E \geq (0,15 \div 0,17) H$.

При проведении ремонтных и восстановительных работ железнодорожного пути используется нормативно-техническая документация [3]. Изложенные в документе требования в большей степени регламентируют параметры установки пути в проектное положение в плане и профиле, а требования к параметрам работы путевых машин при подбивке отсутствуют. При этом качество упаковки балласта напрямую зависит от работы путевой машины. Например, у машины Duomatic 09-32 важными факторами работы являются частота при виброобжати щебня ($32 \div 37$ Гц) и время обжати ($0,8 \div 1,2$ с) [4].

При этом, как показывают испытания пути в реальных производственных условиях, даже на современных путевых машинах при их проектной производительности и рабочей скорости, как правило, достигается $E = (0,11 \div 0,13) H$. Прежде всего это свидетельствует о применении нерациональных режимов работы подбивочных машин, которые никак не контролируются в процессе выполнения операций. Подтверждением этому, также служат данные дирекции по ремонту пути Западно-Сибирской железной дороги, в соответствии с которыми 39 % железнодорожного пути после проведения плановых работ нуждается в повторном ремонте.

В настоящее время делаются попытки контроля осадки щебеночного балласта непосредственно в процессе уплотнения. Но как показывает практика, относительная осадка не всегда корректно отражает степень уплотнения балластного слоя в силу того, что степень уплотнения зависит от таких факторов как загрязненность балласта и его пористость, величина подъема пути и толщина балластного слоя. Указанные факторы определяют нерешенную на сегодняшний день научную проблему, которая заключается в постоянном изменении плотности балластной призмы вследствие изменения ее структуры. Эти изменения не позволяют использовать в полной мере общепринятый показатель для оценки качества подбивки – относительную осадку слоя E . В данной ситуации наилучший эффект может дать установление зависимостей изменения плотности и структуры балластного слоя от параметров вибровоздействий, т.е. от параметров работы подбивочных машин.

Литература

1. Manakov A. L., Igumnov A. A., Kolarzh S. A. Monitoring technical state of transportation vehicles and production machines, Monitoring technical state of transportation vehicles and production machines // Journal of Mining Science. – 2013. – Vol. 49 (4). – P. 630–636.
2. Technical State Monitoring System for Vehicles : Patent Application G07C 5/00 Russian Federation / Manakov A. L., Igumnov A. A., Kirpichnikov A. – No. 2012142455/08(068292). – 2012.

3. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути / Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 18.01.2013 г. – № 75р (в редакции распоряжений ОАО «РЖД» № 1035р от 28.04.2014, № 101р от 21.01.2015, № 480р от 25.02.2015, № 1376р от 17.07.2017).
4. Железнодорожный путь : справочник. – Изд-во DVV Media Group GmbH (Eurailpress), Германия, 1998. – 247 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Горячева И. Г.

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

Основными источниками диссипации энергии при качении, как известно, являются относительное проскальзывание поверхностей в области контактного взаимодействия, несовершенная упругость контактирующих тел и работа, совершаемая силами молекулярного сцепления поверхностей. В докладе представлены модели, позволяющие оценить вклад этих составляющих в формирование силы сопротивления перекатыванию для разных моделей материалов контактирующих тел и условий взаимодействия, и дан анализ особенностей распределения контактных и внутренних напряжений.

Приводится решение задачи о качении вязкоупругого цилиндра по вязкоупругому основанию с учетом зон сцепления и проскальзывания в области контактного взаимодействия. Исследуется зависимость коэффициента трения качения от относительного проскальзывания взаимодействующих тел, коэффициента трения скольжения и механических характеристик взаимодействующих тел.

Представлены результаты моделирования (в плоской и пространственной постановках) трения качения упругих тел при наличии поверхностного вязкоупругого слоя (рис. а), позволяющего учесть влияние промежуточной среды на напряженное состояние (рис. б) взаимодействующих тел и силу сопротивления перекатыванию.

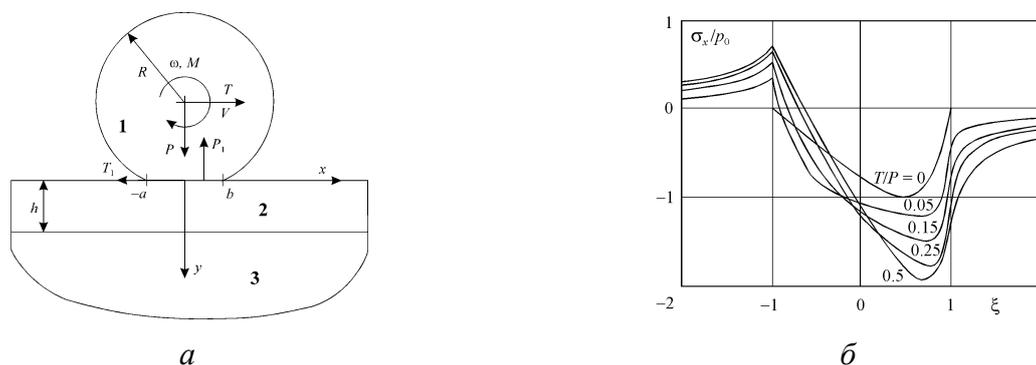


Схема контакта (а) и распределение растягивающих напряжений (б)
при разных значениях T/P

Разработанные модели используются для оценки контактных и внутренних напряжений в системе колесо–рельс при разных условиях взаимодействия [1], а также для анализа динамики торможения упругих и вязкоупругих катящихся тел [2, 3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 20-01-00400.

Литература

1. Goryacheva I. G., Miftakhova A. R. Modelling of the viscoelastic layer effect in rolling contact // *Wear*. – 2019. – Vol. 430. – P. 256–262.
2. Горячева И. Г., Зобова А. А. Динамика упругого цилиндра на упругом основании // *Прикладная математика и механика*. – 2019. – Т. 83 (1). – С. 39–46.
3. Zobova A., Goryacheva I. Dynamics of a viscoelastic cylinder on a viscoelastic half-space // *Acta Mech*, – 2020. – Vol. 231 (6). – P. 2217–2230. – DOI: 10.1007/s00707-020-02643-5.

ВИБРОДИАГНОСТИКА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Шардаков И. Н., Глот И. О., Шестаков А. П., Цветков Р. В.,
Епин В. В., Гусев Г. Н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
13 а, ул. Ленина, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: sharedakov@icmm.ru*

Физические эксперименты с крупномасштабными моделями строительных конструкций дают неоценимый материал для понимания деформационных процессов в объектах с неоднородной структурой и позволяют воспроизвести многоэлементное взаимодействие деталей конструкции на различных масштабных уровнях. В работе представлен результат экспериментального исследования деформационного поведения модельной строительной конструкции в условиях квазистатического нагружения. Модельная конструкция представляет собой фрагмент сборно-монолитного здания, включающий 24 типовых ячейки, объединенные в 4 этажа с габаритными размерами 6×9×6 м. Эксперименты проводились на специальном испытательном стенде, созданном в Институте механики сплошных сред УрО РАН (Пермь, Россия). Функционал стенда позволяет обеспечить получение широкого диапазона состояний исследуемой конструкции – от упругого до неупругого, в том числе наблюдать накопление повреждений элементов конструкции в процессе ее нагружения вплоть до полного ее разрушения.

Одним из видов квазистатического нагружения, реализованного в эксперименте, является приложение сосредоточенных сил, действующих враспор противостоящих колонн и плит перекрытия, расположенных друг против друга. Статическая нагрузка прикладывалась в несколько этапов, с нарастанием значения на каждом этапе и последующем сбросе до нуля. Деформационный отклик регистрировали с помощью системы 57 тензорезисторов, размещенных по всем элементам конструкции. Для контроля расстояний по вертикали между точками приложения пары уравновешенных сил использовали лазерные измерители перемещений. Получены временные зависимости деформаций в различных точках конструкции, а также графики зависимости деформаций и перемещений от приложенного усилия.

Исследование динамических свойств конструкции производилось путем выполнения импульсного силового воздействия в различных точках конструкции и регистрации вибрационного отклика конструкции. Отклик регистрировался системой 24 вибродатчиков (акселерометров), размещенных на колоннах, ригелях и плитах перекрытий. Всего было выполнено 120 импульсных воздействий разной локации, и для каждого из них получены 120 виброграмм на каждом из 24 вибродатчиков.

Получено пространственно-временное распределение деформационного отклика элементов конструкции как в ненагруженном состоянии, так и в условиях приложения квазистатической нагрузки. Проведенные испытания позволили получить вибрационный портрет конструкции, характеризующей ее динамические свойства в неповрежденном состоянии. Эти данные будут в дальнейшем использоваться для сопоставления с вибрационными свойствами конструкции, накапливающей повреждения в процессе неупругого нагружения.

Это исследование ориентировано на выявление закономерностей возникновения повреждений в конструкции при квазистатических нагрузках, поиск предвестников разрушения, а также на разработку критериев, позволяющих регистрировать приближение критического состояния.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Феклистова Е. В., Вильдеман В. Э.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,
e-mail: cem.feklistova@mail.ru; wildemann@pstu.ru*

Требования безопасности и живучести являются важнейшими факторами при конструировании и определяют необходимость учета особенностей поведения технических объектов в аварийных ситуациях. Возникает необходимость изучения основных закономерностей неупругого деформирования, вызванного накоплением повреждений для разработки научных основ прогнозирования, оценки опасности и предотвращения аварийных ситуаций. Одним из способов получения данных о закономерностях процессов неупругого деформирования и разрушения является численный расчет [1–5].

Для проведения численного моделирования необходимо, чтобы математические модели, описывающие поведение материалов, точно отражали основные эффекты поведения при нагружении, описывали основные стадии развития повреждений в материалах и учитывали влияние этих повреждений на процессы деформирования и разрушения.

Настоящая работа направлена на развитие средств численного исследования процессов нелинейного деформирования и разрушения элементов конструкций. В работе рассматриваются основные этапы процесса численного моделирования, приводится краевая задача механики деформирования и разрушения, а также модели разрушения и схемы изменения характеристик поврежденности. Для реализации математической модели в работе приводится алгоритм решения физически нелинейных задач, описывающий процесс решения начиная с построения геометрической модели и до образования сквозной магистральной трещины.

В рамках математической модели выполнено численное моделирование процесса разрушения пластин с концентраторами напряжений в условиях осевого растяжения. Продемонстрирована возможность численного моделирования на основе МКЭ в рамках соотношений механики поврежденной среды процессов возникновения и развития трещин в элементах конструкций. Показана зависимость результатов решения от параметров алгоритма. Предложен оптимальный вариант решения для данной задачи.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке Минобрнауки России, Уникальный идентификатор проекта RFMEFI61920X0017.

Литература

1. Вильдеман В. Э., Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. Механика неупругого деформирования / Под ред. Ю. В. Соколкина. – М : Наука. Изд. фирма «Физматлит», 1997. – 288 с.
2. Накопление структурных повреждений и устойчивое закритическое деформирование композитных материалов / Ю. В. Соколкин, В. Э. Вильдеман, А. В. Зайцев, И. Н. Рочев // Механика композитных материалов. – 1998. – Т. 34 (2). – С. 234–250.
3. Новоселов А. В., Вильдеман В. Э. Исследование характера процесса разрушения ортотропных пластин с концентраторами напряжений на базе вычислительного эксперимента // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – № 4. – С. 33–78.
4. Bazant Z. P., Lusio G. D. Nonlocal microplane model with strain-softening yield limits // International Journal of Solids and Structures. – 2004. – Vol. 41. – P. 7209–7240.
5. Экспериментальные исследования закритического деформирования и разрушения конструкционных материалов / В. Э. Вильдеман, Е. В. Ломакин, М. П. Третьяков, Т. В. Третьякова, Д. С. Лобанов. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2018. – 156 с.

НАБЛЮДЕНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОГО СПЛАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ НЕРАСТВОРИМЫХ КОМПОНЕНТОВ ЗОЛОТО–КОБАЛЬТ IN SITU ПО ИЗМЕНЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА

Толмачев Т. П.^{1,2,3}, Пилюгин В. П.^{2,3}, Пацелов А. М.²

¹ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: tolmachev@imr.uran.ru

²ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация

³ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

Цель работы – наблюдение механического поведения компонентов системы ограниченной растворимости Au-Co, практически нулевой при температуре обработки, по зависимости сопротивления деформационному воздействию во время их механосплавления от давления обработки.

Методом кручения под высоким давлением (КВД) проведено механическое сплавление на порошковых смесях эквиатомного состава в системе ограниченной растворимости золото–кобальт. Во время деформирования биметаллической смеси проводили съемку момента кручения. По полученным данным строили зависимость напряжения сдвига от величины деформации на середине радиуса формирующегося при КВД дискового образца. Провели сравнение с компонентами системы, взятыми в отдельности. Готовые образцы аттестовали методом рентгеновской дифрактометрии и др. При этом давление обработки варьировалось с шагом в 2 ГПа от 6 и заканчивая 12 ГПа.

Установлено, что резкое возрастание напряжения сдвига вначале деформирования до потери линейности превосходит значения напряжения сдвига у чистых компонентов. Участок снижения интенсивности изменения данной характеристики с ростом величины деформации значительно превышает аналогичный у элементных порошков, деформируемых по отдельности. Следующая стадия – выход на стационарный уровень – в случае смесей происходит при больших значениях, чем у отдельных компонентов. Фазовый состав выявил, что на стадии установления стационарного процесса сформировался сплав с преимущественным содержанием твердого раствора Au-Co на основе золота.

Таким образом, методом интенсивной пластической деформации было проведено механическое сплавление нерастворимых друг в друге компонентов системы Au-Co при различном давлении деформации. Наблюдение сопротивления деформированию показало зависимость большинства сплавов от давления. Сравнение с деформационным поведением чистого компонента выявляет наличие участка на кривой, который отвечает за плавный рост напряжения сдвига с величиной деформации, между участком резкого, почти линейного роста и выходом на насыщение, что можно связать с процессами деформационно-индуцированного взаимодействия компонентов. Измерение твердости полученных сплавов показывает практически одинаковые значения твердости, близкие к таковым для деформированного чистого кобальта и значительно превышающие значения для деформированного золота, что при сопоставлении с данными, полученными в динамике, отражает процессы, произошедшие в постдеформационный период, которые могут быть связаны с распадом метастабильной фазы твердого раствора и ростом объемной доли фазы, связанной с кобальтом, в образцах сплавов.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 19-32-60039 и государственного задания. Получение и обработка материалов производились на базе ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург.

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Стрижак В. А., Волкова Л. В., Хасанов Р. Р., Ефремов А. Б.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова,
д. 7, ул. Студенческая, г. Ижевск, 426069, Российская Федерация,
e-mail: ludmila396@rambler.ru*

В работе использовали «СЭМА», реализующий метод акустической тензометрии для металлических объектов различного типоразмера. Для возбуждения и регистрации многократно отраженных акустических импульсов используется электромагнитно-акустический преобразователь, возбуждающий и принимающий два типа волны поляризованных во взаимноперпендикулярных направлениях относительно объекта контроля. Измерительным параметром при этом является разность прихода акустических импульсов в одном отражении, например импульсы на первом и на втором отражении. Метод получения измерительной информации с использованием электромагнитно-акустического преобразования не смотря на значительное количество достоинств (сухой контакт, нечувствительность к качеству поверхности) отличается низкой эффективностью и требует специальных методов построения информационной системы. Для повышения достоверности и устойчивости результатов программное обеспечение использует методы усреднения зарегистрированных сигналов по нескольким реализациям, интерполяцию промежуточных точек с последующим использованием алгоритма поиска максимума корреляционной функции. При этом интерфейс устройства предоставляет для пользователя свободу выбора зоны исследования сигнала, размера и положения корреляционного окна. Цель работы – разработка рекомендаций по выбору настраиваемых параметров программного обеспечения.

Для проверки работоспособности аппаратно-программного комплекса в программной среде MathCad разработана программа автоматической обработки эхограмм. Целевым расчетным параметром при исследовании эхограммы является значение величины сдвига сигнала dt в канале А относительно канала Б, выраженное в микросекундах. Значение целевого параметра dt получено по положению максимума функции корреляции сигнала канала А относительно канала Б. В канале А и Б вырезают два анализируемых окна так, чтобы центр окна находился посередине между максимумами эхо-сигнала каналов А и Б. Окно канала А расширяется и дополняется нулевыми значениями на ширину окна с каждой стороны. Величина смещения по временной оси максимума коэффициента корреляции $K_{кор}$ относительно центра окна является целевым расчетным параметром.

В ходе исследований проведена оценка поведения сдвига сигнала dt в зависимости от положения центра окна анализа и ширины окна анализа в зависимости от номера отражения.

По результатам, значение сдвига сигнала принимает устойчивое положение только после достижения ширины анализируемого окна более 0,6 мкс, что соответствует длительности более полутора периодов рабочей частоты при центральной частоте сигнала в 2,5 МГц (0,4 мкс). При дальнейшем увеличении ширины окна возможно резкое изменение значения целевого параметра до отрицательных значений (отражение № 4). Особенности формы объекта контроля влияют на смещение сдвига сигнала во 2-й позиции датчика. Для отстройки от влияния необходимо в качестве результирующей величины использовать разность исследуемого параметра между 2-м и 1-м отражением. Спектральное искажение сигнала на 3-м отражении и выше, а также снижение амплитуды сигнала на фоне шумов не позволяет использовать отражение 3 и выше для получения целевого параметра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122).

ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНО ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ТРУБНОЙ СТАЛИ 09Г2С НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ, ЦИКЛИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Власов И. В.¹, Сурикова Н. С.², Панин С. В.^{1,2}, Максимов П. В.¹, Яковлев А. В.²,
Гоморова Ю. П.¹, Моисеенко Д. Д.¹

¹Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Российская Федерация

Высокие прочностные характеристики конструкционных сталей традиционно достигаются путем введения различных легирующих элементов, проведения сложных многоступенчатых термомеханических обработок и т. д. Вместе с тем, малоуглеродистые стали характеризуются невысокими прочностными свойствами, сочетающими высокую пластичность/вязкость и хорошую свариваемость. Однако, применение к ним обработок, совмещающих достижение высоких степеней деформации и контролируемого термического воздействия с последующим охлаждением, могут приводить к существенному повышению как предела текучести, так и предела прочности. Таким образом, возможно изготовление высокопрочных и ответственных деталей без использования дорогостоящего легирования, но создание сильно деформированного состояния часто сопровождается охрупчиванием материала.

Для решения этой проблемы используют контролируемую прокатку, обеспечивающую градиентную модификацию структуры в объеме материала [1]. Тем самым достигается формирование материала с повышенной прочностью в поверхностном слое и сохранением вязкости/пластичности в сердцевине. Одним из таких методов является теплая поперечно-винтовая прокатка. Предварительно подобранные температурно-деформационные режимы прокатки [2] позволяют формировать в объеме материала многоуровневую структуру с высокими диссипативными свойствами, эффективно подавляющую локализацию пластического течения и значительно сдерживающую зарождение и распространение трещин.

В качестве объекта исследования была выбрана конструкционная низколегированная сталь 09Г2С, широко применяемая как в строительстве трубопроводных систем, так и для элементов несущих конструкций различного назначения. Прокатку прутков проводили на трехвалковом стане. Было выполнено 5 проходов от температуры 850 °С с закалкой в воду после каждого прохода ($E_{\text{свмм}} = 73,77\%$). Цель данного исследования – изучение влияния поперечно-винтовой (ПВ) прокатки на структуру и сопротивление деформированию и разрушению данной стали.

В состоянии поставки сталь 09Г2С имеет феррито-перлитную структуру с характерным размером зерна 21 ± 2 мкм. После ПВП в поверхностном слое глубиной 1 мм формируется мелкодисперсная структура, состоящая из феррита и разрушенных пластин перлитной фазы. Проведены исследования структуры стали в состоянии поставки и после прокатки с помощью просвечивающего электронного микроскопа (рис. 1 а, б). В перлитном зерне материала без прокатки видны характерные пластины цементита толщиной 100–150 нм (рис. 1 а). В ферритной фазе встречаются карбидные включения размером 250–400 нм. После прокатки происходит измельчение ферритного зерна и разрушение цементитных пластин (рис. 1 б). Средний размер субзерна после прокатки составляет порядка 300 нм, а в поверхностном слое может достигать 100 нм.

Проведено измерение микротвердости в поперечном сечении прутка после ПВ-прокатки от поверхности к центру (рис. 1 в). Наибольшее увеличение микротвердости наблюдается в поверхностном слое глубиной до 3 мм, а упрочнение происходит по всему объему прутка. Образцы для испытаний на статическое растяжение вырезали из прутка после ПВ-прокатки на глубине от 3 мм, где перепад значений микротвердости был не таким существенным, как в поверхностном слое. Результаты испытаний на статическое растяжение показали, что после ПВ-прокатки сохраняется как зуб, так и площадка текучести (рис. 1 г).

Напряжение на площадке текучести и предел пропорциональности повышаются на 26 %. Протяженность площадки текучести увеличивается в 3 раза.

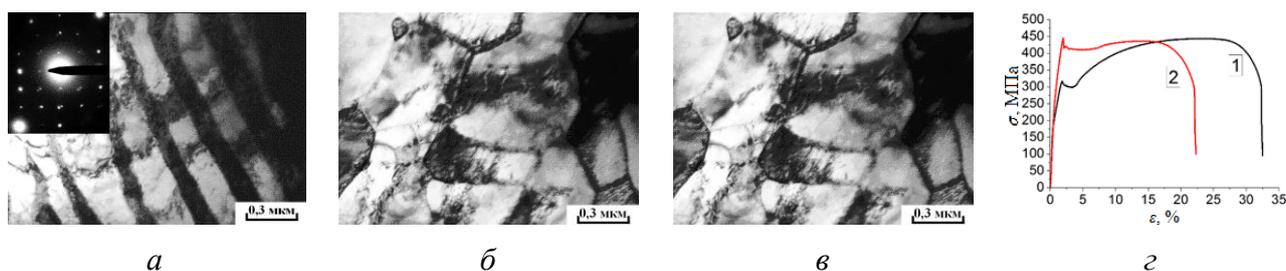


Рис. 1. Структура стали 09Г2С: в исходном состоянии – а; после ПВ-прокатки – б; график микротвердости прутка после проката от края к центру – в; диаграмма растяжения – г; 1 – в состоянии поставки; 2 – после проката

В результате пятиступенчатой прокатки удалось повысить ударную вязкость на всем исследуемом температурном интервале (до -70°C) (рис. 2 а). Рассчитана величина энергии, затраченной на зарождение и распространение трещины (рис. 2 б, в). Показано, что основной причиной повышения ударной вязкости после прокатки является эффективное сопротивление распространению трещины, что видно по отношению затраченной энергии на данном этапе (рис. 2 в), в то время как на этапе зарождения трещины значения энергий для обоих типов образцов достаточно близки (рис. 2 б).

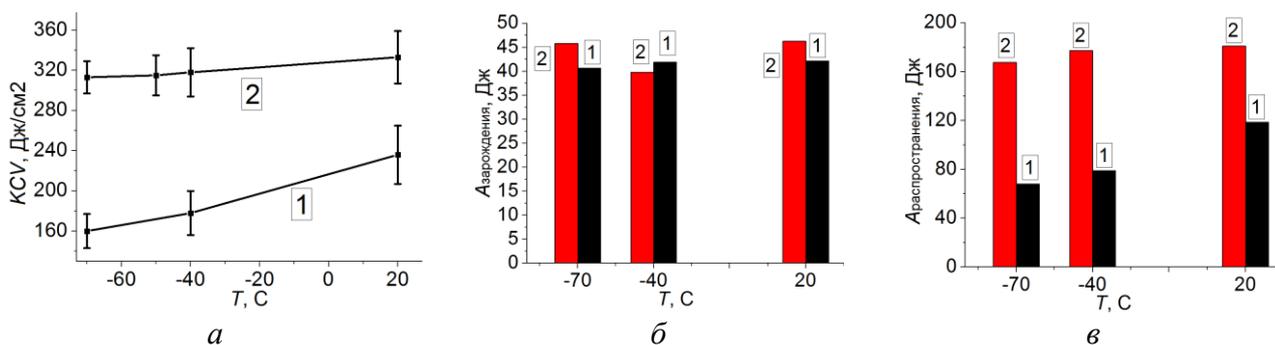


Рис. 2. График ударной вязкости – а; работа зарождения трещины – б; работа распространения трещины – в; 1 – исходное состояние; 2 – образец после ПВП

В процессе поперечно винтовой прокатки стали 09Г2С развиваются эффекты деформационного упрочнения, что сопровождается уменьшением размера зерна, формированием текстуры с градиентным изменением по сечению прутка, а также формированием текстуры в продольном направлении. Таким образом, образцы Шарпи характеризуются более прочным поверхностным слоем и более вязким материалом в сердцевине. Такое сочетание позволяет более эффективно сопротивляться распространению трещины и приводит к практически двукратному повышению ударной вязкости при отрицательных температурах.

Работа проводилась в рамках плана фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013–2020 гг., направления исследований: III.23.1.1 и III.23.1.3. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-38-00679 и 18-08-00516, а также гранта президента НШ-2718.2020.8.

Литература

1. Деревягина Л. С., Гордиенко А. И. Улучшение механических свойств и характеристик низкотемпературного разрушения трубной стали // Сборник трудов конференции «Перспек-

тивные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций». – 2018. – С. 340–34.

2. Пищулова А. А., Гордиенко А. И., Дервягина Л. С. Влияние температурных режимов поперечно-винтовой прокатки на особенности формирования структуры и механические свойства низкоуглеродистой трубной стали // Сборник трудов конференции «Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения». – 2018. – С. 76–77.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ В УСЛОВИЯХ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Смирнов С. В.¹, Мясникова М. В.¹, Мичуров Н. С.¹, Игумнов А. С.²

¹Институт машиноведения УрО РАН,

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

²Институт математики и механики УрО РАН,

16, ул. Софьи Ковалевской, Екатеринбург, 620990, Российская Федерация,

e-mail: marina@imach.uran.ru

При длительном внешнем воздействии механическое поведение всех реальных материалов отличается от поведения упруго-пластического тела. Это отличие проявляется в более или менее интенсивном накоплении деформации в материале под действием постоянных нагрузок. Данный процесс развивается во времени за счет присущих материалу вязкостных свойств и проявляется в ползучести материала. Ползучесть способна лимитировать долговечность тонких покрытий и клеевых соединений на основе полимерных материалов. Поэтому актуальным является проведение исследований, направленных на установление соотношений, связывающих напряжения и деформации с учетом фактора времени. В работе сформулирована цель: с использованием метода инструментального индентирования и численного моделирования условий проведения испытаний разработать подход для исследования напряженно-деформированного состояния при индентировании полимерного покрытия при выдержке в режиме ползучести.

В качестве модельного материала использовали полимерное покрытие на основе коммерческой эпоксидной смолы ЭД-20 с полиэтиленполиаминовым отвердителем. Процесс индентирования осуществляли в два этапа. Первый этап соответствовал стадии внедрения, при котором вертикальное усилие на индентор P линейно возрастало от 0 до своего максимального значения за 5 секунд. Второй этап соответствовал стадии выдержки, которая осуществлялась в течении 100 с при постоянном значении P . Поскольку в заданных условиях нагружения глубина внедрения индентора в покрытие не превышала 1,5 мкм после завершения стадии выдержки, то полученные результаты могут быть использованы для исследования ползучести в поверхностном слое материала.

Данные об особенностях изменения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации получили по результатам численного моделирования в ANSYS. Реологию материала покрытия описывали комбинированной моделью изотропной упруго-вязкопластической среды. При этом вязкостное поведение материала покрытия моделировали с использованием модели, реализованной в ANSYS как Time-Hardening Creep Model. Эта модель содержит эмпирические константы, варьируя значения которых можно управлять скоростью деформации ползучести, а следовательно, для одних и тех же силовых условий нагружения получать разные значения глубины внедрения индентора и связанные с ней значения параметров напряженно-деформированного состояния покрытия в очаге деформации. Этот факт позволил провести процедуру идентификации модели материала покрытия. Идентифицированную модель использовали для построения расчетной диаграммы индентирования. Адекватность процедуры идентификации оценивали путем сравнения расчетной диаграммы индентирования с соответствующей экспериментальной зависимостью. С использованием идентифицированной модели материала покрытия получены поля распределения полной эквивалентной деформации и эквивалентной деформации ползучести в области под индентором.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00571 в части разработки экспериментально-теоретического подхода для исследования напряженно-деформированного состояния при индентировании полимерного покрытия при выдержке в режиме ползучести и по плану исследований темы АААА-А18-118020790145-0 и при поддержке гранта РФФИ № 16-08-01154 в части исследования поведения эпоксидных покрытий при локальных механических воздействиях.

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ ПЭЭК, ПФС, ПИ

Панин С. В.^{1,2}, Корниенко Л. А.¹, Алексенко В. О.^{1,2}, Буслович Д. Г.^{1,2}, Бочкарева С. А.¹,
Нгуен Дык Ань², Донцов Ю. В.², Ло Цзянкунь², Ле Тхи Ми Хиеп²

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

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

В настоящее время разработано большое количество высокотемпературных пластиков, обладающих высокими механическими свойствами, особенно при высоких степенях наполнения армирующими высокомодульными волокнами: полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полифениленсульфид (ПФС), полиимид (ПИ) и др. Однако они не могут быть эффективно использованы для антифрикционных приложений, как по причине высокого коэффициента трения, так и повреждающего (микроабразивного) воздействия на (металлическое) контртело. Указанная проблема может решаться путем введения твердосмазочных наполнителей, прежде всего ПТФЭ, который способен снижать интенсивность износа на несколько порядков. Однако наполнение ПТФЭ заметно снижает механические свойства композитов, что может быть компенсировано введением армирующих наполнителей. Таким образом, требуемые высокие свойства могут быть обеспечены одновременным введением нескольких наполнителей. Однако количество их сочетаний может быть довольно большим, поэтому необходим научно обоснованный подход, позволяющий по ограниченному количеству экспериментальных данных подобрать оптимальную рецептуру композиции. На основе экспериментальных исследований создается банк данных, в котором можно отследить связь между составом композиции и ее эффективными физико-механическими свойствами. Эта информация служит основой для решения задачи конструирования материала с заданными свойствами.

С целью определения оптимального состава (рецептуры) композиции, придающей материалу заданные эффективные свойства или попадание их в заранее заданные интервалы, используется следующий метод. Экспериментальные данные дополняются опорными точками, полученными за счет применения линейной интерполяции в виде полинома Лагранжа. Полученные зависимости эффективных характеристик от управляющих параметров строятся в виде поверхностей и соответствующих изолиний. На графиках изолиний выделяются области с необходимыми эффективными характеристиками. Совмещение (наложение) графиков позволяет определить область пересечения, которая определяет необходимое (оптимальное) содержание наполнителей (твердосмазочных и армирующих), обеспечивающих заданные значения эффективным характеристикам композиций на основе ПЭЭК, ПФС и ПИ. Показано, что твердосмазочный наполнитель (ПТФЭ) позволяет в условиях металло-полимерных и керамо-полимерных трибосопряжений за счет эффекта самосмазывания повышать сопротивление изнашиванию в десятки раз и исключить микроабразивное изнашивание обоих типов контртел. Совместное введение твердосмазочных и армирующих наполнителей в полимерную матрицу позволяет комплексно повысить трибомеханические характеристики, расширяя тем самым номенклатуру и области применения полимерных композитов с заданными эксплуатационными свойствами в узлах трения машин и механизмов в условиях металло-полимерных и керамо-полимерных трибосопряжений. С использованием разработанного алгоритма проектирования многокомпонентных композитов с заданными механическими и трибологическими характеристиками разработаны высокопрочные антифрикционные композиты для медицины (ортопедия, травматология, челюстно-лицевая хирургия и пр.)

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013–2020 гг. по направлению фундаментальных исследований III.23.1.3. Проведение исследований поддержано РФФИ в рамках научных проектов № 18-58-00037 и 20-58-00032.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ УДАРНО-ТЯГОВОГО УСТРОЙСТВА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ МЕТОДАМИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МЕТАЛЛОВ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Игумнова Т. В., Бехер С. А.

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
191, ул. Дуси Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация,
e-mail: tatyna979@mail.ru*

Безопасность транспортных перевозок на железнодорожном транспорте во многом зависит от качества ремонта, включая применение неразрушающего контроля (НК). Традиционно на железнодорожном транспорте применяются несколько методов НК: визуально-измерительный, ультразвуковой, магнитопорошковый, вихретоковый. Эти методы могут быть использованы в различных комбинациях при дефектоскопии деталей тележки грузового вагона. Номенклатура исследуемых деталей определяется технологическими инструкциями, действующими в отрасли железнодорожного транспорта [1]. В настоящий момент на железнодорожном транспорте ряд ответственных деталей тележки грузового вагона контролируются двумя обязательными методами неразрушающего контроля: магнитным и вихретоковым. В работе проведены исследования наиболее ответственных деталей ударно-тягового устройства, клинья тягового хомута, маятниковые подвески, входящие в комплект деталей, передающих нагрузку на раму вагона [2]. Клинья тягового хомута изготавливаются штамповкой из стали марки 38 ХС по [3]. Для ряда образцов проведены механические испытания материала образца на соответствие предъявляемым к данной марке стали требованиям.

В работе получены данные магнитопорошкового и вихретокового контроля для выборки деталей клина тягового хомута, забракованных при плановых видах ремонта деталей в вагоноремонтном предприятии. Технология проведения контроля соответствовала технологии, которая должна применяться при плановых испытаниях деталей в эксплуатации. На первом этапе работы выполнен сравнительный анализ чувствительности двух методов неразрушающего контроля по применяемой технологии. Полученные индикаторные рисунки по результатам контроля двумя методами и результаты зарегистрированных информативных параметров контроля сравнивались с результатами оценки реальных размеров дефектов после разрушающих испытаний образцов. При применении магнитопорошкового контроля вероятность браковки дефектного клина близка к 100 %, вероятность ошибки первого рода при применении вихретокового контроля составила 20 %. Применение существующей технологии подтверждает необходимость первоочередного применения магнитных методов неразрушающего контроля для контроля деталей ударно-тягового устройства грузового вагона. Проведенные разрушающие испытания позволили дать точную оценку существовавшего в детали дефекта и провести анализ механизмов формирования дефектов – усталостных трещин. Для узла «клинья тягового хомута–тяговый хомут–хвостовик корпуса автосцепки» было проведено численное моделирование эксплуатационных нагрузок. Анализ напряженно-деформированного состояния клина показал, что максимальными являются касательные напряжения в поперечных сечениях, расположенных на расстоянии 75 и 120 мм от нижнего основания, а также на расстоянии 55 и 105 мм от верхнего основания, что соответствовало наиболее вероятному месту образования усталостных трещин в исследуемых образцах.

Литература

1. ПР НК В.4. Правила неразрушающего контроля деталей сцепных устройств, транспортера, тормозного и электрического оборудования и других деталей вагонов при ремонте. Специальные требования [введен 01 января 2015 г.]. – Кишинев : Пятьдесят девятое заседание Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, 2013. – 82 с.

2. ГОСТ 33434-2015. Устройство сцепное и автосцепное железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки [введен 01 сентября 2016]. – М. : Стандартинформ, 2015. – 18 с.
3. ГОСТ 4543-2016.Metalлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия [введен 01 октября 2017 г.]. – М. : Стандартинформ, 2019. – 47 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО ОБРАЗЦА НА РАЗРЫВ МЕЖДУ СЛОЕВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОГЕЗИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Вильдеман В. Э., Мугатаров А. И.

*Кафедра экспериментальной механики и конструкционного материаловедения
Пермского национального исследовательского политехнического университета,
15, Академика Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация,
e-mail: wildemann@pstu.ru; cem_mugatarov@mail.ru*

Одной из широко применяемых в настоящее время моделей разрушения материалов является модель когезионного разрушения [1–5]. Основное предположение состоит в формировании в качестве продолжения трещины зоны, где материал хоть и является поврежденным, все еще способен выдерживать напряжения. В такой зоне происходит рассеивание энергии: она начинает формироваться, когда нормальное напряжение достигает предела прочности материала на разрыв. Можно сказать, что в данной модели рассматриваются материалы, в которых реализуется закритическая стадия деформирования [6].

В работе представлены результаты моделирования процесса деформирования и разрушения композитного образца на разрыв между слоями. Слой, сцепляющий две части образца, состоял из когезионных элементов с различными модулями спада (от 100 до 16 000 МПа, модуль Юнга – 4000 МПа). Это соответствует упругопластическому материалу с линейным разупрочнением на закритической стадии деформирования. Построена эпюра нормальных напряжений в слое, показано, как реализуется полная диаграмма деформирования материала, определена область сжатия. Выявлено, каким образом происходит изменение данной эпюры по мере деформирования тела. Построены расчетные диаграммы нагружения. Выявлено, что с уменьшением модуля спада происходит увеличение нагрузки, выдерживаемой конструкцией. Это связано с большим размером участка, где реализуется закритическая стадия деформирования. Отмечено, что с уменьшением модуля спада увеличивается перемещение накладок. Это связано с увеличением податливости системы. На диаграммах нагружения отмечены точки, где впервые достигается предел прочности материала слоя происходит разрушение. Выявлено, что нагрузка способна значительно увеличиваться после начала реализации закритической стадии. Построены гистограммы зависимости максимальной длины трещины от модуля спада. Из гистограммы видно, что в некотором диапазоне существует обратная пропорциональность между максимальной длиной трещины и модулем спада; после достижения некоторого значения модуля спада максимальная длина трещины становится практически неизменной. Это связано с увеличением жесткости нагружающей системы в виде композитных частей образца по сравнению с жесткостью сцепляющего слоя.

Численные исследования в рамках описания процесса деформирования и разрушения композитного образца на разрыв между слоями проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ ФСНМ-2020-0027).

Литература

1. Constante C. J., Campilho R., Moura D. C. Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2015. – Vol. 136. – P. 292–304.
2. Schwalbe K., Scheider I., Cornec A. Guidelines for Applying Cohesive Models to the Damage Behaviour of Engineering Materials and Structures. – Heidelberg, New York, Dordrecht, London : Springer, 2013.
3. Effects of interface adhesive and resin cohesive strength on tensile strength of resin sand based on numerical analysis / Yun-dong Ji, Zi-han Liu, Kai-dong Zheng, Jia-bo Li, Hai-xiao Hu & Dong-feng Cao // *China Foundry*. – 2019. – Vol. 16 (6). – P. 406–413. – DOI: 10.1007/s41230-019-9074-x.

4. Zhang J., He M. J., Li Z. Numerical analysis on tensile performance of bolted glulam joints with initial local cracks // *Journal of Wood Science*. – 2018. – Vol. 64 (4). – P. 364–376.
5. Внук М. П. Модель когезионной зоны с учетом параметра трехосности // *Физическая мезомеханика*. – 2001. – Т. 4 (4). – С. 9–19.
6. Вильдеман В. Э. О решениях упругопластических задач с граничными условиями контактного типа для тел с зонами разупрочнения // *Прикладная математика и механика*. – 1998. – Т. 62 (2). – С. 304–312.

УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА С ЖЕСТКИМ ТЕЛОМ КАК ЭЛЕМЕНТАХ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Чертова Н. В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
2/4, пр. Академический, Томск, 634021, Российская Федерация,
e-mail: chertova@ispms.tsc.ru*

Свободные поверхности представляют границы тела при определенных условиях внешнего нагружения и являются характерной особенностью пористых тел и тел при наличии трещин. В последнее время актуальность изучения роли свободных поверхностей обусловлена интенсивными исследованиями, разработками и использованием наноструктурных материалов, в частности пористой нанокерамики [1]. Исследование деформаций на границе раздела с жестким телом имеет важное значение с точки зрения анализа деформационного поведения дисперсионно упрочненных материалов и сплавов. Эти границы раздела, как и свободные поверхности, оказывают существенное влияние на физические и эксплуатационные свойства твердых тел, определяемые закономерностями процессов деформации и разрушения [2].

Напряженно-деформированное состояние (НДС) формируется в процессе распространения, взаимодействия и затухания волн. Для исследования НДС на границе раздела упругого тела рассмотрим задачу прохождения волны через границу. Традиционно при решении этой задачи находятся коэффициенты Френеля и определяются потоки энергий вторичных волн [3]. Коэффициенты Френеля позволяют определить и проанализировать деформационные моды на границе, характеризующие формоизменение и поворот бесконечно малого элемента среды. Таким образом, были изучены закономерности деформаций на свободной поверхности, границе раздела двух упругих тел при условии идеального контакта [4] и идеального скольжения [5].

В классической механике сплошной среды граница раздела представляет бесконечно тонкий слой. В действительности граница имеет некоторый объем и обладает физико-механическими свойствами отличными от свойств контактирующих тел. Существует ряд подходов к построению моделей сред, структурная неоднородность которых обусловлена наличием границ раздела [6]. В работе рассматриваются закономерности деформаций на границах раздела, представляющих структурный элемент, в рамках традиционной модели слоистых сред [3]. Граничные условия позволяют получить аналитические выражения для коэффициентов отражения и компонент деформаций на границе. Вычислены и проанализированы зависимости деформаций и упругих параметров контактирующих сред на границе раздела и в слое $\frac{1}{2}$ от толщины слоя. Определяются экстремальные значения деформаций на границе.

Полученные результаты показывают, что напряженно-деформированное состояние на рассматриваемых границах существенно зависит от используемой физико-математической модели границы. Границы, представляющие структурные элементы, по сравнению с классическим аналогом механики сплошных сред могут иметь деформации более опасные с точки зрения разрушения при определенных упругих свойствах тел и границы, также ее размеров.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.1.4 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 09-0100264-а.

Литература

1. Andrievski R. A. and Gleser A. M. Strength of nanostructures // Phys. Usp. – 2009. – Vol. 52 (4). – P. 315–334. – DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904a.0337.

2. Grain and interface boundaries governed strengthening mechanisms in metallic multilayers / Q. Zhou, P. Huang, M. Liu, F. Wang, K. Xu and T. Lu. // *J. Alloy. Compd.* – 2017. – Vol. 698. – P. 906–912. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.12.254 0925-8388.
3. Бреховский Л. М., Годин А. О. Акустика слоистых сред. – М. : Наука, 1989. – 416 с.
4. Чертова Н. В., Гриняев Ю. В. Закономерности напряженно-деформированного состояния на границе раздела упругих сред при идеальном контакте // *Физ. мезомеханика.* – 2018. – Т. 21 (2). – С. 56–67.
5. Чертова Н. В., Гриняев Ю. В. Характер деформаций на границе раздела упругих сред при условии скольжения // *Письма в ЖТФ.* – 2018. – Т. 44 (9). – С. 88–94.
6. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы // *ДАН ССС.* – 1979. – Т. 247 (4). – С. 829–832.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Antimonov A. M., 366
Belova O. N., 281
Dmitry O. Reznikov, 86
Estemirova S. X., 140
Fomenko S. I., 126
Funk A., 375
Glinkova S. A., 126
Golub M. V., 126
Iordanskii A. L., 244
Kavardzhikov V., 319
Kurbanova E. D., 140
Levashova Ye. L., 155
Mironova E. A., 283
Mueller I., 126
Nikhamkin M. Sh., 277
Nikolay A. Makhutov, 86
Olkhov A. A., 244
Pashkouleva D., 319
Pavel H. Chukachev, 154
Peksheva A. A., 283
Polukhin V. A., 140
Pushkareva N. B., 366
Sazhenkov N. A., 277
Shpak A. N., 126
Solomonov D. G., 277
Stepanova L. V., 281, 283, 284
Stoilov G., 319
Vladimir V. Zatsarinny, 86
Waske A., 375
Yakovitskaya M. V., 155
Yordan N. MIRCHEV, 154
Zernova Yu. N., 244
Zhabbarov R. M., 284
Zhukova M. A., 155
Абабков Н. В., 274
Абашкин Е. Е., 44
Абдуллина Д. Н., 263
Авдеева Е. С., 298
Авруцкий В. В., 253
Агапитова О. Ю., 234
Адамов А. А., 19, 181, 304
Акимова А. В., 99, 100, 101, 102, 204, 261, 262
Аккузин С. А., 265
Алексенко В. О., 394
Алмаева К. В., 229, 265
Альшанская А. А., 27
Аммосов Г. С., 151
Андреев А. Н., 288
Андреев П. В., 13, 302
Аникин Е. В., 259
Анкудинов А. Б., 78, 211
Антонов М. Д., 254
Афанасьева О. С., 349
Ахметханов Р. С., 142, 144
Ахметшин Л. Р., 130
Бабайлов Н. А., 59, 324, 327
Бадиков К. А., 240
Бакина О. В., 170
Балакирев А. А., 280
Балина О. В., 103, 137
Банников М. В., 231, 348
Барышников А. А., 242
Бахтин В. М., 249
Бекренев Н. В., 322
Белецкий Е. Н., 194, 202
Белов Н. Н., 257
Белоглазова Ю. А., 85
Беломестнов М. С., 306
Беляев А. К., 220
Беляев А. Ю., 47, 233
Беляева Н. А., 175
Бербасова Т. И., 351
Бережной Д. В., 53
Берестова С. А., 183, 184
Берман А. Ф., 3
Бехер С. А., 45, 395
Билалов Д. А., 231
Бирюков А. В., 8
Блохин В. В., 213
Бобров А. Л., 45
Богдан О. П., 275
Богданова Н. А., 46, 65
Борисов В. В., 108, 110
Борцов А. А., 359
Ботвина Л. Р., 194, 202
Бочкарева С. А., 394
Бродова И. Г., 21, 180
Брусенцева Т. А., 190
Буравлев И. Ю., 105
Бурков М. В., 341
Бурмашева Н. В., 328, 329, 330, 331, 333, 335
Буров А. Е., 312, 353
Буслович Д. Г., 394
Бухалова О. В., 102
Бушуева Н. И., 371
Бывальцев С. В., 234
Бычков Н. Г., 253
Бяков А. В., 341

Валуйская Л. А., 257
 Васильев А. П., 6
 Васильева А. А., 205
 Ващенко С. С., 168
 Веремейчик А. И., 313
 Веретенникова И. А., 107, 174
 Веселов И. Н., 272
 Веселова В. Е., 239
 Видюк Т. М., 189
 Вильдеман В. Э., 37, 387, 397
 Виндокуров Д. С., 217
 Вихарева Е. В., 99
 Вичужанин Д. И., 199
 Владимиров А. П., 81
 Владыкин А. В., 217
 Власов Д. Д., 343
 Власов И. В., 390
 Вознюк Н. В., 102
 Волегов П. С., 69, 72, 77
 Волков А. Ю., 115
 Волков В. П., 239
 Волков С. С., 11
 Волкова Л. В., 389
 Вопнерук А. А., 123
 Воронина А. О., 85
 Воронова Л. М., 54, 55
 Воронцов М. А., 184
 Востоков М. М., 13
 Гагарских О. Н., 85
 Гагиев В. В., 101
 Гаришин О. К., 117
 Гармашев А. Ю., 359
 Герасимов Р. М., 72
 Герцен Т. А., 276
 Гижевский Б. А., 55
 Гладковский С. В., 199, 239, 245
 Глебов В. Е., 349
 Глот И. О., 386
 Глухих И. И., 18
 Глухов А. В., 115
 Гнедовец А. Г., 78
 Голиков Н. И., 218
 Гольшев А. А., 15
 Гоморова Ю. П., 390
 Гончар А. В., 266, 267
 Гордиенко П. С., 105
 Горкунов Э. С., 67, 374
 Горшков А. В., 336, 337, 338, 339, 340
 Горячева И. Г., 385
 Грибов Д. С., 74
 Гришко В. В., 85
 Громов В. Е., 187
 Губарь С. А., 177
 Гудзь Д. А., 302
 Гуляев В. П., 133
 Гумеров А. К., 50, 53
 Гусев Г. Н., 386
 Давыдов Д. И., 317
 Давыдова Н. С., 259
 Данилов С. В., 29
 Данилова С. Н., 6, 105
 Данильченко С. А., 295
 Дегтярев М. В., 54, 55
 Деменев А. С., 362
 Дементьев В. Б., 314
 Денисевич Д. С., 240, 242
 Денисенко Д. В., 36
 Денисов В. Н., 108, 110
 Десятова А. В., 99
 Дли М. И., 111
 Дмитриев С. Ф., 124
 Добаткин С. В., 194
 Добрышкин А. Ю., 30
 Долгих В. С., 286
 Донцов Ю. В., 394
 Доронин С. В., 27
 Драгошанский Ю. Н., 197
 Дроздов В. О., 189
 Друкаренко Н. А., 81
 Дубинин Е. Ф., 70
 Дьяконов А. А., 6
 Евсеев М. В., 134
 Емельянов И. Г., 24, 25
 Еникеев Ф. У., 356
 Епин В. В., 386
 Еремин А. В., 341
 Еремин М. О., 344
 Ермилов А. С., 276
 Ерошенко А. Ю., 348
 Ефремов А. Б., 389
 Жаворонкова Е. Ю., 187
 Жавыркин В. В., 343
 Жачкин С. Ю., 8
 Жилин С. Г., 46, 61, 65, 172
 Жирков А. Р., 218
 Жихарева И. Г., 36
 Жуков Д. В., 9
 Завьялов З. И., 359
 Задворкин С. М., 67, 374
 Зайцев Д. В., 370, 375
 Залазинский А. Г., 118, 234
 Заматовский А. Е., 367
 Запарий Вас. В., 55
 Запарий Вл. В., 55

Засыпкин А. Д., 314
 Зеленский В. А., 78, 211
 Зельдович В. И., 263
 Зинин А. В., 22, 213, 221, 253
 Злобин Д. В., 275
 Злобина И. В., 322
 Зубань В. Н., 221
 Зубова Е. М., 368
 Иванов А. А., 167, 179
 Иванов А. М., 168
 Иванов В. А., 312
 Иванов Д. С., 151
 Иванченко В. С., 18
 Игнатъева Е. Г., 105
 Игумнов А. А., 383
 Игумнов А. С., 393
 Игумнова Т. В., 395
 Изможерова Н. В., 249
 Изюмов Р. И., 169, 233
 Ильиных Г. В., 350
 Исакова Е. В., 306
 Истомина А. Ю., 364
 Ишков А. В., 124
 Кадочников Д. Ю., 362
 Казакбаева А. А., 215
 Казаков А. Л., 63
 Казаков К. Е., 153
 Казанцев А. В., 19
 Казанцева Е. А., 326
 Казанцева Н. В., 317
 Калинин С. В., 59
 Калонов А. А., 115
 Каманцев И. С., 118, 237
 Каменецих А. С., 47
 Каменских А. А., 296, 298, 304
 Канакин В. С., 378, 382
 Кантемиров И. Ф., 50
 Карагерги Р. П., 134
 Карманов В. В., 217
 Катаева Н. В., 367
 Катасонов А. О., 124
 Кацуба И. С., 322
 Кашин О. А., 170
 Келлер И. Э., 19, 209
 Киреева И. В., 17
 Кириков С. В., 266
 Кириллина Д. Ю., 120
 Кисеев В. М., 370
 Кислицын В. Д., 117
 Кленов А. И., 359, 363
 Ключников В. А., 266
 Коваль А. В., 362
 Коган Л. Х., 113
 Козлов А. В., 114, 134
 Козлов К. А., 367
 Колосова Е. М., 295
 Комаров Д. В., 83
 Комаров О. Н., 46, 61, 65, 121, 172
 Комаров Р. В., 363
 Комарова Е. Г., 326
 Комиссарова И. А., 205
 Комиссарова С. А., 83
 Кондратьев Н. С., 76, 135, 148, 278
 Коновалов А. В., 114, 134, 378, 380
 Коновалов Д. А., 107, 114, 174
 Коновалов С. В., 9, 83, 205
 Корниенко Л. А., 394
 Корнилова З. Г., 151
 Коробенков М. В., 354
 Коростелева Д. М., 225, 227
 Косарев В. Ф., 15
 Котельников А. Б., 123
 Котельникова Н. В., 77
 Круглов А. А., 245, 356
 Круковский К. В., 170
 Крючева К. Д., 374
 Крючков Д. И., 118
 Ксенофонтов П. В., 218
 Кузнецов А. В., 237
 Куксова В. И., 70
 Кукшинов А. И., 162
 Кулемин А. В., 202
 Курилин С. П., 108, 110
 Курмоярцева К. А., 77
 Кутенева С. В., 199
 Кычкин А. К., 6
 Лазарева Н. Н., 120
 Ланцев Е. А., 13
 Лаптев М. Ю., 181
 Ларина Е. А., 331, 333
 Ле Тхи Ми Хиен, 394
 Левин В. П., 202, 207
 Лепешкин А. Р., 289, 290
 Лесникова Ю. И., 360
 Липатникова Я. Д., 257
 Лисин А. Н., 213
 Литовченко И. Ю., 229, 265
 Ло Цзянкунь, 394
 Лобанева Е. И., 111
 Лобанов Д. С., 51
 Лобанов М. Л., 29
 Лобкова Т. Е., 165
 Логинов Ю. Н., 324
 Лопатин А. В., 353

Лотков А. И., 170
 Лукашук О. А., 26
 Лутфуллин Р. Я., 245, 356
 Луферов В. С., 108
 Лучин А. В., 170
 Любимова Н. Ю., 276
 Любутин П. С., 341
 Лягаева А. Г., 101
 Лях В. Д., 101
 Ляшков К. А., 367
 Мазурова М. Л., 204
 Майрамбекова А. М., 348
 Макаревич Е. С., 135
 Макаренко И. В., 43
 Макаренко Л. В., 43
 Макаров А. В., 7, 113, 123, 180, 270
 Макаров Г. Н., 248
 Максимов П. В., 390
 Малашенко В. В., 251
 Малашенко Т. И., 251
 Малехонова Н. В., 13
 Мали В. И., 189
 Маликов А. Г., 5
 Маликов В. Н., 124
 Мамылин Д. А., 184
 Манаков А. Л., 383
 Масленников К. Б., 29
 Маслов С. В., 162
 Матвиенко Ю. Г., 20
 Махутов Н. А., 43
 Мельников Н. Н., 55
 Микушина В. А., 186
 Милащенко А. И., 288
 Миляев И. М., 211
 Мин Ко Хлайнг, 30
 Миронов В. А., 99, 100, 101, 261, 262, 288
 Миронов В. И., 25, 26
 Михайлов С. Б., 272
 Миховски М. М., 316
 Мичуров Н. С., 107, 393
 Мишакин В. В., 266, 267
 Мишталь Е. Ю., 149
 Мозалев В. В., 213
 Моисеенко Д. Д., 390
 Мокрушина М. И., 314
 Морозов И. А., 47
 Москвичев В. В., 164
 Мугатаров А. И., 397
 Муканов Г. Ж., 307, 309
 Мулюков Р. Р., 245
 Муравьева О. В., 275
 Мурзина Г. Р., 356
 Мурзинова С. А., 364
 Мусохранов В. В., 67
 Мушников А. Н., 64, 67, 374
 Мясникова М. В., 393
 Надежкин М. В., 344
 Назаров В. В., 289, 290
 Наймарк О. Б., 79, 85, 201, 231, 311, 348
 Наседкин А. В., 295, 300
 Наседкина А. А., 295, 300
 Нассар М. Э., 300
 Нассонов В. В., 103, 137
 Наумов С. В., 55
 Нгуен Дык Ань, 394
 Недзвецкий П. Д., 199
 Непомнящий А. С., 237
 Нефедова О. А., 63, 82
 Никитюк А. С., 85
 Николаева Е. П., 270
 Нихамкин М. Ш., 280
 Носкова Е. В., 172
 Носов Ю. О., 304
 Носова Е. А., 205
 Нуруллаев Э. М., 276
 Няшина Н. Д., 278
 Оборин А. Н., 19
 Оборин В. А., 79, 201, 231, 348
 Обухов И. А., 223, 224
 Огорелков Д. А., 24, 26
 Одинцев И. Н., 138
 Окатьев Р. С., 87
 Оришич А. М., 5, 15
 Осинцев К. А., 205
 Осоргина И. В., 169
 Останина Т. В., 89
 Остапович К. В., 58
 Охлопкова А. А., 6, 105, 120
 Павлов В. Ф., 351
 Павлов П. В., 81
 Палабугина П. А., 100
 Панин С. В., 291, 293, 341, 390, 394
 Панфилов Г. П., 370
 Панфилов П. Е., 370
 Панченко Е. Н., 224
 Панькова А. П., 296
 Паршин Д. А., 236
 Патлусов Е. П., 299
 Патраков Е. И., 55
 Пацелов А. М., 317, 388
 Пелевин А. Г., 169
 Перовская М. В., 237
 Першин А. В., 253
 Пестов А. В., 107, 174

Петров Д. С., 48
 Петров П. П., 133
 Петрова А. Н., 21
 Петровцев А. В., 363
 Петухов Д. С., 19, 209
 Петухов Е.А., 359
 Пилипенко Г. С., 32
 Пилюгин В. П., 388
 Платонов А. А., 168
 Плотников А. С., 138
 Плохих А. И., 255
 Плугатарь Т. П., 138
 Победенная З. В., 17
 Поволоцкая А. М., 374
 Подседерцев А. Н., 278
 Полехина Н. А., 265
 Полилов А. Н., 343
 Поляков А. П., 196
 Поляков П. А., 196
 Полянский В. А., 220
 Полянский Л. И., 324
 Попов А. А., 100, 249, 288, 306
 Попов А. В., 121, 172
 Попов А. И., 34
 Попов Н. А., 317
 Попов Ф. С., 128
 Предеин В. В., 121
 Привалова В. В., 156, 158, 160, 320, 345, 346
 Просвиряков Е. Ю., 156, 158, 160, 320, 328, 329, 330, 331, 333, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 345, 346
 Пугачева Н. Б., 7
 Пудов В. И., 197
 Пургин А. А., 184
 Путилова Е. А., 67, 374
 Путырский С. В., 255
 Пучков А. Ю., 111
 Пьянков В. А., 373
 Пьянков И. Н., 373
 Раджагопал А., 300
 Радченко В. П., 349, 351
 Разоренов С. В., 263
 Разумовский И. А., 32
 Реков А. М., 96
 Романов К. А., 98
 Романов С. И., 170
 Рузаев С. В., 55
 Рыбальченко О. В., 194
 Рыжова А. О., 45
 Савицкий П. А., 59
 Савкин А. Н., 240, 242
 Саврай Р. А., 113
 Сагалаков А. М., 124
 Саженов Н. А., 280
 Сазонов М. И., 313
 Салихьянов Д. Р., 239
 Самсонов А. А., 225, 227
 Санников И. И., 218
 Сараев Ю. Н., 237
 Сараева А. А., 17
 Саркеева А. А., 245, 246
 Сарычев В. Д., 187
 Сахабутдинова Л. Р., 357
 Свистков А. Л., 117, 169, 233
 Северов П. Б., 192
 Седов А. А., 240, 242
 Семенов А. А., 48
 Семенов С. В., 280
 Семенчук В. М., 237
 Сенаева Е. И., 7
 Серебряный В. Н., 267
 Сидоров К. С., 359, 363
 Сильвестров С. А., 50, 53
 Сильников М. В., 12
 Симонов М. Ю., 79
 Синев И. О., 194, 202
 Скобелина Е. К., 272
 Слепцова С. А., 6, 120, 269
 Сметанина К. Е., 13, 302
 Сметанников О. Ю., 350, 357
 Смирнов А. С., 378, 380, 382
 Смирнов Е. Б., 359
 Смирнов С. В., 107, 174, 393
 Смирнова Е. О., 174
 Смолин И. Ю., 130, 186, 215
 Соболева Н. Н., 113, 123, 180, 270
 Соковиков М. А., 79, 201
 Соколова Л. А., 259, 261, 262
 Соловей В. Д., 64
 Соловьев П. С., 225, 227
 Соловьев С. И., 225, 227
 Соловьева Ю. В., 257
 Соснин А. А., 61
 Спевак Л. Ф., 63, 82, 327
 Старенченко В. А., 257
 Старикова У. С., 180
 Староверов О. А., 37
 Степанова К. В., 133
 Степанова Л. В., 286
 Степченко А. К., 123
 Столбовский А. В., 364
 Стрижак В. А., 389
 Стружанов В. В., 132

Струнгарь Е. М., 51
Сундер Р., 242
Сурикова Н. С., 390
Сызранцев В. Н., 254
Сызранцева К. В., 165
Сысоев Е. О., 30
Сысоев О. Е., 30
Тарасова А. В., 275
Татусь Н. А., 343
Ташкинов А. А., 91
Теплухин В. Г., 34
Терентьев Н. Н., 218
Терехина А. И., 348
Титков В. В., 291, 293
Титов В. Г., 234
Толмачев Т. П., 388
Третьяков Д. А., 220
Третьяков М. П., 37, 368
Третьякова Т. В., 368
Трифонов Г. И., 8
Троицкий О. А., 168
Трофимов В. Н., 19, 217, 373
Трусов П. В., 58, 69, 74, 76, 77, 87, 89, 93,
95, 98, 128, 135, 146, 148, 149
Труфанов А. Н., 360
Тхай Ю. Р., 204
Тютин М. Р., 194, 202
Уваров С. В., 201
Урцев В. Н., 29
Урцев Н. В., 29
Устюгова Т. Н., 298
Устюхин А. С., 211
Ушканов А. А., 269
Фадеев Д. А., 124
Фалахутдинов Р. М., 364
Федоров В. В., 261
Федотовская К. И., 99, 100
Фейгин А. В., 177
Феклистова Е. В., 387
Филиппов А. А., 15, 56
Фомин В. М., 15, 56, 190
Фридман Е. А., 102
Фролова Н. Ю., 263
Хакимов А. Г., 376
Халиман П. А., 172
Хасанов Р. Р., 389
Хачай А. Ю., 4
Хачай О. А., 4
Хачай О. Ю., 4
Хвисевич В. М., 313
Хейфец А. Э., 263
Холкин И. В., 262
Холманских Е. О., 204
Хомская И. В., 263
Хусаинова Д. Ф., 259, 261, 262
Цветков А. С., 34
Цветков Р. В., 386
Чайкин А. Е., 132
Чашухина Т. И., 54, 55
Ченцов А. Г., 28
Черепанов А. Н., 189
Черепанов Д. Н., 257
Черепанова Н. М., 102
Чермошенцева А. С., 179
Чернов В. С., 299
Черновалова М. В., 110, 111
Чернякова Н. А., 164
Чернятин А. С., 32
Чертова Н. В., 399
Чечулина Е. А., 128
Чирков А. О., 344
Чугайнов С. Б., 19
Чудинов В. В., 79
Чудинов В. С., 169
Чумляков Ю. И., 17
Шабалин Д. Н., 34
Шабашов В. А., 367
Шавшуков В. Е., 91
Шадрин В. В., 117
Шалковский Д. М., 363
Шалыгин М. Г., 248
Шамбатов М. А., 249
Шардаков И. Н., 386
Шарифуллина Э. Р., 93, 146
Шаркеев Ю. П., 326, 348
Шатов А. В., 353
Швейкин А. И., 93, 98, 146
Швейкин А. И., 89
Шестаков А. П., 386
Шикалов В. С., 190
Шимов Г. В., 371
Шипачева Т. Н., 204
Ширинкина И. Г., 21
Широбоков А. Е., 363
Ширяев А. А., 217
Шистириков М. А., 359, 362
Шишин Н. Н., 59
Шмидт В. В., 36
Шорохов Е. В., 263
Шустов В. С., 78
Юркевич А. В., 39, 41, 165
Юркевич Л. Н., 39, 41
Юсупов Д. Т., 359, 362, 363
Яковлев А. В., 390

Яковлев А. Ю., 148
Янц А. Ю., 148, 149

Ярусова С. Б., 105

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОСНОВАНИЕ СВОЙСТВ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА САМООРГАНИЗАЦИИ Берман А. Ф.	3
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИИ СТРУКТУРЫ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНО-ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР Хачай О. А., Хачай А. Ю., Хачай О. Ю.	4
ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ Маликов А. Г., Оришич А. М.	5
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИФЕНИЛГУАНИДИНА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА Дьяконов А. А., Данилова С. Н., Васильев А. П., Охлопкова А. А., Слепцова С. А., Кычкин А. К.	6
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МАТЕРИАЛА СОЕДИНЕНИЯ 12X18H10T/Cu/VT1-0 Пугачева Н. Б., Сенаева Е. И., Макаров А. В.	7
ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ Жачкин С. Ю., Трифонов Г. И., Бирюков А. В.	8
ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ТОЛЩИНОМЕТРИИ Жуков Д. В., Коновалов С. В.	9
ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЗЕРЕН МИКРОСТРУКТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА Волков С. С.	11
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН С ДВУХФАЗНЫМИ ГАЗОЖИДКОСТНЫМИ СРЕДАМИ Сильников М. В.	12
ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И КОБАЛЬТА Сметанина К. Е., Андреев П. В., Ланцев Е. А., Малехонова Н. В., Востоков М. М.	13
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ СТАЛЬНОГО ШАРИКА С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ВЫРАЩЕННОЙ МЕТОДОМ ХГН И ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ Фомин В. М., Голышев А. А., Косарев В. Ф., Оришич А. М., Филиппов А. А.	15
ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ И АСИММЕТРИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА (COCrFeNi) ₉₄ Ti ₂ Al ₄ Сараева А. А., Победенная З. В., Киреева И. В., Чумляков Ю. И.	17
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРИРОДНОГО ФЕРРИТА ЖЕЛЕЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ Иванченко В. С., Глухих И. И.	18

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЭТАПНОЙ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ТОНКОСТЕННОГО СОСУДА И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ	
Келлер И. Э., Казанцев А. В., Адамов А. А., Петухов Д. С., Трофимов В. Н., Оборин А. Н., Чугайнов С. Б.	19
МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ И МОНИТОРИНГ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОМ	
Матвиенко Ю. Г.	20
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЕРСПЕКТИВНОГО AL-ZN-MG-FE-NI СПЛАВА ПРИ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ	
Бродова И. Г., Ширинкина И. Г., Петрова А. Н.	21
ОЦЕНКА РЕСУРСА КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЭРОЗИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ПОТОКА	
Зинин А. В.	22
НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОЛСТОСТЕННОЙ СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ КОНТАКТА С ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДОЙ	
Емельянов И. Г., Огорелков Д. А.	24
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ СТАЛИ 09Г2С ПРИ УЧЕТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА	
Емельянов И. Г., Миронов В. И.	25
ВЛИЯНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ НА РЕЗОНАНСНУЮ АМПЛИТУДУ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННОЙ БАЛКИ	
Миронов В. И., Огорелков Д. А., Лукашук О. А.	26
РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕСУРСА СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	
Альшанская А. А., Доронин С. В.	27
ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ МАРШРУТИЗАЦИИ: ТЕОРИЯ И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ (АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА, МАШИНОСТРОЕНИЕ)	
Ченцов А. Г.	28
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ТРУБНЫХ ИЗДЕЛИЙ	
Данилов С. В., Урцев Н. В., Масленников К. Б., Урцев В. Н., Лобанов М. Л.	29
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАЗОМКНУТОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С МАЛОЙ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССОЙ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ КРЕПЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ	
Добрышкин А. Ю., Мин Ко Хлайнг, Сысоев О. Е., Сысоев Е. О.	30
К ПРИМЕНЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ	
Разумовский И. А., Чернятин А. С., Пилипенко Г. С.	32
ФОРМИРОВАНИЕ КАРБИДОВ В СТАЛИ 15Х2МФА, МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ НИОБИЕМ	
Теплухин В. Г., Цветков А. С., Попов А. И., Шабалин Д. Н.	34

РОЛЬ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ В ПОЛУЧЕНИИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ СПЛАВАМИ Fe-Ni, Co-Mn, Ni-Cr Жихарева И. Г., Шмидт В. В., Денисенко Д. В.	36
ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ И НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ Вильдеман В. Э., Староверов О. А., Третьяков М. П.	37
ДИАГНОСТИКА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ ТОРСИОНОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ С ВНУТРЕННЕЙ СИЛОВОЙ ФУНКЦИЕЙ Юркевич А. В., Юркевич Л. Н.	39
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕДУР МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ТОРСИОНОВ ПЕРЕДАЧИ БЛАГОНРАВОВА Юркевич А. В., Юркевич Л. Н.	41
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОТВЕТСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ НЕОДНОРОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ Махутов Н. А., Макаренко И. В., Макаренко Л. В.	43
ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ В НЕРАЗЪЕМНОМ СОЕДИНЕНИИ ИЗ СТАЛИ 45 Абашкин Е. Е.	44
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ Бобров А. Л., Бехер С. А., Рыжова А. О.	45
ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРОВ КАНАЛОВ ПРИ МУНДШТУЧНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВОГО ПАРАФИНОВОГО ТЕЛА НА ПАРАМЕТРЫ ПРЕССОВКИ Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.	46
НАНОИНДЕНТАЦИЯ НЕОДНОРОДНОГО СЕТОЧНОГО УГЛЕРОД-СОДЕРЖАЩЕГО НАНОПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ УПРУГОГО ПОЛИУРЕТАНА Морозов И. А., Беляев А. Ю., Каменецких А. С.	47
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ Петров Д. С., Семенов А. А.	48
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ Сильвестров С. А., Кантемиров И. Ф., Гумеров А. К.	50
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПО МЕТОДУ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ Струнгарь Е. М., Лобанов Д. С.	51
НОВАЯ УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С НЕНОРМАТИВНОЙ КРИВИЗНОЙ Сильвестров С. А., Бережной Д. В., Гумеров А. К.	53

КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛА (001) НИОБИЯ ПРИ БОЛЬШОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ Дегтярев М. В., Воронова Л. М., Чашухина Т. И.	54
ТВЕРДОСТЬ И СТРУКТУРА БРОНЕВОЙ СТАЛИ УРАЛМАШЕВСКИХ САМОХОДНЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ УСТАНОВОК СУ-85 и СУ-100 Гижевский Б. А., Дегтярев М. В., Чашухина Т. И., Воронова Л. М., Патраков Е. И., Наумов С. В., Мельников Н. Н., Рузаев С. В., Запарий Вас. В., Запарий Вл. В.	55
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНООБЪЕКТОВ Филиппов А. А., Фомин В. М.	56
РЕДУЦИРОВАННЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ЭВОЛЮЦИИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА Остапович К. В., Трусов П. В.	58
РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ Шишин Н. Н., Савицкий П. А., Калинин С. В., Бабайлов Н. А.	59
СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННОЙ ПОКОВКИ В УСТРОЙСТВЕ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА Соснин А. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.	61
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ИСТОЧНИКОМ Казачков А. Л., Спевак Л. Ф., Нефедова О. А.	63
ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ МЕДИ ОТ ДЕФОРМАЦИИ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ Соловей В. Д., Мушников А. Н.	64
ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ ОКСИДНОГО СЛОЯ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ Жилин С. Г., Комаров О. Н., Богданова Н. А.	65
ВЛИЯНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТЕЛЬНОЙ СТАЛИ 20К Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Путилова Е. А., Мушников А. Н., Мусохранов В. В.	67
МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭВОЛЮЦИИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ Волегов П. С., Трусов П. В.	69
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ Дубинин Е. Ф., Куксова В. И.	70
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОПОР И КРАЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ Герасимов Р. М., Волегов П. С.	72
ТРЕХУРОВНЕВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СЛОЖНОГО НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ, ВКЛЮЧАЮЩАЯ УЧЕТ ПЛОТНОСТЕЙ ДЕФЕКТОВ И ИХ ЭВОЛЮЦИЮ Грибов Д. С., Трусов П. В.	74

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА СТАТИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ Кондратьев Н. С., Трусов П. В.	76
МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ: ОПИСАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ МИКРОТРЕЩИН Курмоярцева К. А., Котельникова Н. В., Волегов П. С., Трусов П. В.	77
СВОЙСТВА НИКЕЛЕВОГО МАТЕРИАЛА С БИМОДАЛЬНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ Шустов В. С., Зеленский В. А., Анкудинов А. Б., Гнедовец А. Г.	78
МЕХАНИЧЕСКИЕ И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВОВ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ СДВИГОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ Сокоиков М. А., Симонов М. Ю., Оборин В. А., Чудинов В. В., Наймарк О. Б.	79
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В НЕКОТОРЫХ МОДЕЛЬНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ Владимиров А. П., Друкаренко Н. А., Павлов П. В.	81
ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Нефедова О. А., Спевак Л. Ф.	82
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ ДИАГНОСТИКИ Комаров Д. В., Коновалов С. В., Комиссарова С. А.	83
ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ Никитюк А. С., Воронина А. О., Белоглазова Ю. А., Гагарских О. Н., Гришко В. В., Наймарк О. Б.	85
FATIGUE PREDICTION ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF PROBABILISTIC MECHANICAL PROPERTIES Nikolay A. Makhutov, Vladimir V. Zatsarinny, Dmitry O. Reznikov	86
МОДИФИКАЦИЯ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СИСТЕМАХ СКОЛЬЖЕНИЯ В ТЕРМИНАХ РАЗГРУЖЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ Окатьев Р. С., Трусов П. В.	87
ОПИСАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ В МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЯХ МЕТАЛЛОВ Останина Т. В., Трусов П. В., Швейкин А.И.	89
ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ КЛАСТЕРЫ ЗЕРЕН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ Ташкинов А. А., Шавшуков В. Е.	91
МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ Швейкин А. И., Трусов П. В., Шарифуллина Э. Р.	93
МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОНСТИТУТИВНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ: СТРУКТУРА, ВОЗМОЖНОСТИ, ПЕРСПЕКТИВЫ Трусов П. В.	95

ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ПЛОСКОСТИ ПРОКАТКИ И НА БОКОВЫХ КРОМКАХ ПОЛОСЫ Реков А. М.	96
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ Швейкин А. И., Трусов П. В., Романов К. А.	98
ОЦЕНКА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА МУЖЧИН С НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ МЕТОДОМ РИТМОКАРДИОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ Акимова А. В., Миронов В. А., Федотовская К. И., Вихарева Е. В., Десятова А. В.	99
НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ДИСПЛАЗИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ КАК ФАКТОР РИСКА ПЕРЕЛОМОВ У МОЛОДЫХ МУЖЧИН Акимова А. В., Миронов В. А., Попов А. А., Палабугина П. А., Федотовская К. И.	100
ПСИХОВЕГЕТАТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОЛОДЫХ МУЖЧИН С НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ Акимова А. В., Миронов В. А., Лях В. Д., Гагиев В. В., Лягаева А. Г.	101
СИНДРОМ СТАРЧЕСКОЙ АСТЕНИИ И СОПУТСТВУЮЩАЯ ПАТОЛОГИЯ У ПАЦИЕНТОВ ГЕРИАТРИЧЕСКОГО СТАЦИОНАРА Акимова А. В., Бухалова О. В., Вознюк Н. В., Фридман Е. А., Черепанова Н. М.	102
БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА Балина О. В., Нассонов В. В.	103
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО ВОЛЛАСТОНИТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВМПЭ Данилова С. Н., Охлопкова А. А., Ярусова С. Б., Гордиенко П. С., Буравлев И. Ю., Игнатъева Е. Г.	105
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЮ Смирнов С. В., Коновалов Д. А., Веретенникова И. А., Мичуров Н. С., Пестов А. В.	107
ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНО-ЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ Борисов В. В., Денисов В. Н., Курилин С. П., Луферов В. С.	108
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ Борисов В. В., Денисов В. Н., Курилин С. П., Черновалова М. В.	110
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ФОСФОРА В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА Дли М. И., Пучков А. Ю., Лобанева Е. И., Черновалова М. В.	111
ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ КОНТАКТНОМ НАГРУЖЕНИИ ПОКРЫТИЯ ПГ-10К-01, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ГАЗОПОРОШКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ Саврай Р. А., Коган Л. Х., Макаров А. В., Соболева Н. Н.	113
ОСОБЕННОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ КОЛЬЦЕВОГО ОБРАЗЦА ПРИ АКСИАЛЬНОМ СЖАТИИ ПЛОСКИМ ШТАМПОМ Коновалов Д. А., Козлов А. В., Коновалов А. В.	114

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ Cu/Al/Mg-ПРОВОДОВ Калонов А. А., Глухов А. В., Волков А. Ю.	115
МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ С НАПОЛНИТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ (ЗЕРНА, ПЛАСТИНКИ, ВОЛОКНА) Гаришин О. К., Кислицын В. Д., Свистков А. Л., Шадрин В. В.	117
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ НА ОТРЫВ СЛОИСТОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА С НАДРЕЗАМИ Крючков Д. И., Залазинский А. Г., Каманцев И. С.	118
РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕР-СИЛИКАТНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ПРИРОДНОГО ВЕРМИКУЛИТА С ДОБАВКОЙ FORUM Лазарева Н. Н., Кириллина Д. Ю., Слепцова С. А., Охлопкова А. А.	120
ВЛИЯНИЕ ОПЕРАЦИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ АЛЮМОТЕРМИТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ И ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н.	121
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ Степченков А. К., Макаров А. В., Соболева Н. Н., Вопнерук А. А., Котельников А. Б.	123
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СТАЛЬНЫХ ТРУБ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ Дмитриев С. Ф., Ишков А. В., Фадеев Д. А., Маликов В. Н., Сагалаков А. М., Катасонов А. О.	124
GUIDED WAVES SENSING WITH PIEZOELECTRIC WAFER ACTIVE SENSORS Shpak A. N., Golub M. V., Glinkova S. A., Fomenko S. I., Mueller I.	126
СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА – ЛЕ ШАТЕЛЬЕ Чечулина Е. А., Попов Ф. С., Трусов П. В.	128
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МЕХАНИЧЕСКОГО МЕТАМАТЕРИАЛА НА ЕГО ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ Ахметшин Л. Р., Смолин И. Ю.	130
РАЗРУШЕНИЕ ТОНКОСТЕННОГО СФЕРИЧЕСКОГО СОСУДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ Стружанов В. В., Чайкин А. Е.	132
ИЗМЕНЕНИЕ УШИРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ДИФРАКЦИОННОЙ ЛИНИИ ПРИ УПРУГОМ ВНЕЦЕНТРЕННОМ РАСТЯЖЕНИИ СОСТАВНОГО (ТРЕХСЛОЙНОГО) КОМПАКТНОГО ОБРАЗЦА Гуляев В. П., Петров П. П., Степанова К. В.	133
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ КОЛЬЦЕВОГО ОБРАЗЦА НА СТАДИИ ЕГО ОВАЛИЗАЦИИ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕМ РАСТЯЖЕНИИ Карагерги Р. П., Коновалов А. В., Козлов А. В., Евсеев М. В.	134
МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА: ОПИСАНИЕ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ Макаревич Е. С., Кондратьев Н. С., Трусов П. В.	135

<p>ДИАГНОСТИКА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ В КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЕ Нассонов В. В., Балина О. В.</p>	137
<p>ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО-УПРОЧНЕННЫХ СЛОЯХ МАТЕРИАЛОВ Одинцев И. Н., Плотников А. С., Плугатарь Т. П.</p>	138
<p>DENDRITE-REINFORCED AMORPHOUS AND GRAPHENE-REINFORCED METAL COMPOSITES. DEFORMATION MECHANISMS AND STRENGTH CHARACTERISTICS Polukhin V. A., Estemirova S. X., Kurbanova E. D.</p>	140
<p>ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОШЛИФОВ ПРИ НАГРУЗОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ Ахметханов Р. С.</p>	142
<p>ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АКУСТИЧЕСКИМ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ Ахметханов Р. С.</p>	144
<p>ТРЕХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Шарифуллина Э. Р., Трусов П. В., Швейкин А. И.</p>	146
<p>ПРЯМАЯ ТРЕХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ПОЛИКРИСТАЛЛА: ВЛИЯНИЕ ГРАНИЦ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦА Янц А. Ю., Трусов П. В., Яковлев А. Ю., Кондратьев Н. С.</p>	148
<p>ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ В МАКРОФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ УПРУГОПЛАСТИЧНОСТИ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГОГО ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО СПИНА Янц А. Ю., Миштадь Е. Ю., Трусов П. В.</p>	149
<p>ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СОСТОЯНИЕ ПОДВОДНОГО ПЕРЕХОДА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА «ХАТАССЫ–ПАВЛОВСК» ЧЕРЕЗ Р. ЛЕНА Аммосов Г. С., Корнилова З. Г., Иванов Д. С.</p>	151
<p>О НАПРЯЖЕНИЯХ ПОД ВТУЛКОЙ, НАДЕТОЙ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ТРУБУ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ Казаков К. Е.</p>	153
<p>AUTOMATIC SYSTEMS FOR ULTRASONIC INSPECTION OF PIPELINES (SURVEY) Yordan N. MIRCHEV, Pavel H. Chukachev</p>	154
<p>STRUCTURAL ASPECTS OF DEFORMATION IN STUDYING EARLY STAGES OF THE DISINTEGRATION OF MARTENSITE IN THE NATURAL AGING PROCESS Zhukova M. A., Levashova Ye. L., Yakovitskaya M. V.</p>	155
<p>ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА ПРИ УСЛОВИИ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО НАГРЕВА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю.</p>	156

<p>КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ТИПА КУЭТТА-ПУАЗЕЙЛЯ С УЧЕТОМ КВАДРАТИЧНОГО НАГРЕВА ОДНОЙ ГРАНИЦЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю.</p>	158
<p>ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ БЕНАРА–РЭЛЕЯ С УЧЕТОМ КВАДРАТИЧНОГО НАГРЕВА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю.</p>	160
<p>РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОБОРУДОВАНИЯ, ПО ДАННЫМ ТЕНЗОИЗМЕРЕНИЙ Маслов С. В., Кукшинов А. И.</p>	162
<p>ОЦЕНКИ РЕСУРСА, НАДЕЖНОСТИ И РИСК-АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ Москвичев В. В., Чернякова Н. А.</p>	164
<p>МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ТОРСИОНОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ Сызранцева К. В., Лобкова Т. Е., Юркевич А. В.</p>	165
<p>НАПОЛНЕННЫЕ ПОЛИАЛЮМОСИЛИКАТЫ В КАЧЕСТВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА АЛЮМИНИЕВЫХ ОСНОВАНИЯХ Иванов А. А.</p>	167
<p>ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА И ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 10КП5 Иванов А. М., Платонов А. А., Троицкий О. А., Ващенко С. С.</p>	168
<p>ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ КАРБОНИЗИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ Изюмов Р. И., Чудинов В. С., Свистков А. Л., Осоргина И. В., Пелевин А. Г.</p>	169
<p>РАЗРАБОТКА МЕХАНИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫХ МАКРООБРАЗЦОВ КРЕМНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ ОБЛАСТЬ ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННОЙ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ, ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНЕ Круковский К. В., Кашин О. А., Романов С. И., Бакина О. В., Лотков А. И., Лучин А. В.</p>	170
<p>ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ ПОЛУЧЕННЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ ПРИ ВВЕДЕНИИ В СОСТАВ ИСХОДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА Попов А. В., Халиман П. А., Носкова Е. В., Комаров О. Н., Жилин С. Г.</p>	172
<p>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ИЗ ЭПОКСИДНОГО КЛЕЯ ЭТП-2 Смирнов С. В., Веретенникова И. А., Смирнова Е. О., Коновалов Д. А., Пестов А. В.</p>	174
<p>ТЕРМОВЯЗКОУПРУГАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОГО ИЗДЕЛИЯ Беляева Н. А.</p>	175
<p>ВОЗМОЖНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С АРОЧНЫМИ ЗУБЬЯМИ Губарь С. А., Фейгин А. В.</p>	177

ПОЛИАЛЮМОСИЛИКАТЫ ДЕНДРИМЕРНОЙ МОРФОЛОГИИ И УСТАНОВЛЕНИЕ ПОЛИКОНДЕНСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ПРОЦЕССЕ ИХ НАНЕСЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ 3D-АЭРОЗОЛЬНОЙ ПЕЧАТИ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ОСНОВАНИЯ Иванов А. А., Чермошенцева А. С.	179
ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА РАЗМЕР ЗЕРНА В СПЛАВЕ АЦ7НЖ Старикова У. С., Соболева Н. Н., Макаров А. В., Бродова И. Г.	180
ИСПЫТАНИЯ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПО НОРМАЛИ К СЛОЯМ Адамов А. А., Лаптев М. Ю.	181
ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ В ТЕРМИНАХ СОБСТВЕННЫХ УПРУГИХ СОСТОЯНИЙ Берестова С. А.	183
ДИЗАЙН АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ Мамылин Д. А., Пургин А. А., Воронцов М. А., Берестова С. А.	184
ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В КЕРАМИЧЕСКОМ КОМПОЗИТЕ Микушина В. А., Смолин И. Ю.	186
БЕЛЫЙ СЛОЙ – ИНИЦИАТОР ТРЕЩИН НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСАХ Жаворонкова Е. Ю., Сарычев В. Д., Громов В. Е.	187
К ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ. Черепанов А. Н., Дроздов В. О., Мали В. И., Видюк Т. М.	189
НАНЕСЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ Брусенцева Т. А., Шикалов В. С., Фомин В. М.	190
АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ Северов П. Б.	192
КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ МИКРОПОВРЕЖДЕНИЙ В МАЛО-УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ И ПОСЛЕ РКУП-ОБРАБОТКИ Синев И. О., Белецкий Е. Н., Тютин М. Р., Ботвина Л. Р., Рыбальченко О. В., Добаткин С. В.	194
ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО И КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК К ПОРОШКУ ЖЕЛЕЗА НА ВЕЛИЧИНУ ПРЕДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ Поляков П. А., Поляков А. П.	196
ПЕРСПЕКТИВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕКСТУРИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ Драгошанский Ю. Н., Пудов В. И.	197
СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ И ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ТИПА «СТАЛЬ–РЕЗИНА» Гладковский С. В., Недзвецкий П. Д., Вичужанин Д. И., Кутенева С. В.	199

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОГО РЕСУРСА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6 ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ГИГАЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ Оборин В. А., Соковик М. А., Уваров С. В., Наймарк О. Б.	201
ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ СПЛАВА Д16ЧАТВ Белецкий Е. Н., Ботвина Л. Р., Тютин М. Р., Левин В. П., Синев И. О., Кулемин А. В.	202
ОЦЕНКА КЛИНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЦИЕНТОВ С СИНДРОМОМ СТАРЧЕСКОЙ АСТЕНИИ Акимова А. В., Холманских Е. О., Тхай Ю. Р., Шипачева Т. Н., Мазурова М. Л.	204
ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ Васильева А. А., Коновалов С. В., Носова Е. А., Осинцев К. А., Комиссарова И. А.	205
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЕРАРХИИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ Левин В. П.	207
ЭВОЛЮЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ПОЛЕТНЫХ ЦИКЛАХ Петухов Д. С., Келлер И. Э.	209
ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ FE-30CR-(8-16)CO ПОРОШКОВЫХ МАГНИТОТВЕРДЫХ СПЛАВОВ Устюхин А. С., Зеленский В. А., Миляев И. М., Анкудинов А. Б.	211
РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ТОРМОЗНЫХ ДИСКОВ ПО УСЛОВИЯМ ПРОЧНОСТИ Блохин В. В., Мозалев В. В., Зинин А. В., Лисин А. Н.	213
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕЖРАЗЛОМНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ФРОНТОВ Казакбаева А. А., Смолин И. Ю.	215
ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ Трофимов В. Н., Карманов В. В., Ширяев А. А., Владыкин А. В., Виндокуров Д. С.	217
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ГАЗОПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА Санников И. И., Голиков Н. И., Терентьев Н. Н., Ксенофонтов П. В., Жирков А. Р.	218
АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ АНИЗОТРОПНЫХ МЕТАЛЛОВ Третьяков Д. А., Беляев А. К., Полянский В. А.	220
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ АВИАЦИОННЫХ КОЛЕС В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ Зубань В. Н., Зинин А. В.	221
УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА СУСТАВНОГО КОНЦА КОСТИ ПРИ ОРГАНОСБЕРЕГАЮЩЕМ ОПЕРАТИВНОМ ЛЕЧЕНИИ РЕВМАТОИДНЫХ АРТРИТОВ ПЯСТНОФАЛАНГОВЫХ СУСТАВОВ ПАЛЬЦЕВ КИСТИ Обухов И. А.	223

ДИСТРАКЦИОННЫЙ МЕТОД В ЛЕЧЕНИИ ЖЕНЩИН В ПОСТМЕНОПАУЗАЛЬНОМ ПЕРИОДЕ С ПОСЛЕДСТВИЯМИ ПЕРЕЛОМОВ ДИСТАЛЬНОГО ЭПИМЕТАФИЗА ЛУЧЕВОЙ КОСТИ Панченко Е. Н., Обухов И. А.	224
СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТЕРЖНЯ С ДВУМЯ ПРИСОЕДИНЕННЫМИ ГРУЗАМИ Коростелева Д. М., Самсонов А. А., Соловьев П. С., Соловьев С. И.	225
КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛЬНОЙ БАЛКИ С УПРУГО ПРИСОЕДИНЕННЫМ ГРУЗОМ Самсонов А. А., Коростелева Д. М., Соловьев П. С., Соловьев С. И.	227
ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРУ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-823 Алмаева К. В., Литовченко И. Ю.	229
ПОСТРОЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ РОСТА ТРЕЩИНЫ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПО ДАННЫМ ФРАКТОГРАФИИ Банников М. В., Билалов Д. А., Оборин В. А., Наймарк О. Б.	231
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИЛОВОЙ МОДУЛЯЦИИ Беляев А. Ю., Изюмов Р. И., Свистков А. Л.	233
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ Бывальцев С. В., Залазинский А. Г., Агапитова О. Ю., Титов В. Г.	234
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ВО ВРЕМЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ МНОГОСЛОЙНОЙ НИТЕВОЙ НАВИВКИ Паршин Д. А.	236
ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ С УПРАВЛЯЕМЫМ И НЕУПРАВЛЯЕМЫМ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЕМ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ Сараев Ю. Н., Каманцев И. С., Перовская М. В., Кузнецов А. В., Семенчук В. М., Непомнящий А. С.	237
РЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23 В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ДЕФОРМАЦИИ Веселова В. Е., Гладковский С. В., Волков В. П., Салихьянов Д. Р.	239
ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МЕСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЕЕ ВЕРШИНЕ Савкин А. Н., Денисевич Д. С., Седов А. А., Бадиков К. А.	240
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ АМПЛИТУДЕ НАГРУЖЕНИЯ Савкин А. Н., Сундер Р., Седов А. А., Денисевич Д. С., Барышников А. А.	242
ELECTROSPINNING OF BIOPOLYMER – POLY-3-HYDROXYBUTYRATE Olkhov A. A., Zernova Yu. N., Iordanskii A. L.	244
РОЛЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОЕДИНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА Саркеева А. А., Гладковский С. В., Лутфуллин Р. Я., Круглов А. А., Мулюков Р. Р.	245

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОМУ НАГРУЖЕНИЮ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 Саркеева А. А.	246
АНАЛИЗ СПОСОБОВ УСИЛЕНИЯ СТОЕК КОНИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ Макаров Г. Н., Шалыгин М. Г.	248
СТРУКТУРА АНТИГИПЕРТЕНЗИВНОЙ ТЕРАПИИ У АМБУЛАТОРНЫХ ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ Шамбатов М. А., Изможерова Н. В., Попов А. А., Бахтин В. М.	249
ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ Малашенко В. В., Малашенко Т. И.	251
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА ТЕРМОУСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА Авруцкий В. В., Першин А. В., Бычков Н. Г., Зинин А. В.	253
АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ Сызранцев В. Н., Антонов М. Д.	254
МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА Путырский С. В., Плохих А. И.	255
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ Липатникова Я. Д., Соловьева Ю. В., Старенченко В. А., Белов Н. Н., Валуйская Л. А., Черепанов Д. Н.	257
ВОЗДЕЙСТВИЕ БЕТА-БЛОКАТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИНФАРКТА МИОКАРДА ПРИ ОСТРОМ КОРОНАРНОМ СИНДРОМЕ БЕЗ ПОДЪЕМА СЕГМЕНТА ST Хусаинова Д. Ф., Аникин Е. В., Соколова Л. А., Давыдова Н. С.	259
РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ ТАКТИКИ «РАНДЕВУ» НА ДОГОСПИТАЛЬНОМ ЭТАПЕ ОКАЗАНИЯ СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ Хусаинова Д. Ф., Федоров В. В., Соколова Л. А., Акимова А. В., Миронов В. А.	261
АНТИТРОМБОТИЧЕСКАЯ ТЕРАПИЯ У БОЛЬНЫХ С ОСТРЫМ КОРОНАРНЫМ СИНДРОМОМ С ПОДЪЕМОМ СЕГМЕНТА ST НА ЭТАПЕ СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ Хусаинова Д. Ф., Холкин И. В., Соколова Л. А., Акимова А. В., Миронов В. А.	262
ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СПЛАВОВ МЕДИ С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ Хомская И. В., Разоренов С. В., Шорохов Е. В., Зельдович В. И., Абдуллина Д. Н., Фролова Н. Ю., Хейфец А. Э.	263
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181 Литовченко И. Ю., Полехина Н. А., Алмаева К. В., Аккузин С. А.	265

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ УПРУГИХ ВОЛН Мишакин В. В., Гончар А. В., Кириков С. В., Ключников В. А.	266
ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕКСТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ Мишакин В. В., Серебряный В. Н., Гончар А. В.	267
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ КОМБИНИРОВАННОГО НАПОЛНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА Ушканов А. А., Слепцова С. А.	269
ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ИНДЕНТОРА ПРИ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ПОКРЫТИЯ NiCrBSi–Cr ₃ C ₂ НА ЕГО МИКРОТВЕРДОСТЬ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ Николаева Е. П., Соболева Н. Н., Макаров А. В.	270
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ ХРОМОМОЛИБДЕНОВОЙ СТАЛИ Скобелина Е. К., Веселов И. Н., Михайлов С. Б.	272
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЯХ Абабков Н. В.	274
АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПЛОТНОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА Богдан О. П., Муравьева О. В., Злобин Д. В., Тарасова А. В.	275
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МОРОЗОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ Любимова Н. Ю., Нуруллаев Э. М., Ермилов А. С., Герцен Т. А.	276
VARIATION OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF CARBON/EPOXI FIBER LAMINATE AS A RESULT OF FATIGUE DAMAGE Nikhamkin M. Sh., Solomonov D. G., Sazhenkov N. A.	277
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНКУРЕНТНОГО РОСТА КРИСТАЛЛОВ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО НАПЛАВЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ Няшина Н. Д., Подседерцев А. Н., Кондратьев Н. С.	278
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОТОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИБРОДИАГНОСТИКИ Семенов С. В., Нихамкин М. Ш., Саженов Н. А., Балакирев А. А.	280
A COMPUTATIONAL STUDY OF MIXED MODE CRACK GROWTH: MOLECULAR DYNAMICS METHOD Stepanova L. V., Belova O. N.	281
PERTURBATION METHODS IN NONLINEAR FRACTURE MECHANICS: STATE-OF-THE-ART FACILITIES AND RESULTS Stepanova L. V., Mironova E. A., Peksheva A. A.	283

QUASILINEARIZATION METHOD FOR ANALYTICAL SOLUTIONS TO NONLINEAR PROBLEMS OF SOLID MECHANICS: A PLATE WITH CENTRAL CIRCULAR HOLE UNDER CREEP REGIME Stepanova L. V., Zhabbarov R. M.	284
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ, Т-НАПРЯЖЕНИЙ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЫСШИХ ПРИБЛИЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ С ДВУМЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ И НАКЛОННЫМИ ТРЕЩИНАМИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ РЕШЕНИЕ Степанова Л. В., Долгих В. С.	286
ВЕГЕТАТИВНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ПЕЙСМЕКЕРНОЙ АКТИВНОСТИ СИНОАТРИАЛЬНОГО УЗЛА ПРИ ХОБЛ В ПЕРИОДЫ ОБОСТРЕНИЯ И РЕМИССИИ Милащенко А. И., Андреев А. Н., Миронов В. А., Попов А. А.	288
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ ДО МОМЕНТА ВРЕМЕНИ НАЧАЛА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ Назаров В. В., Лепешкин А. Р.	289
АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ЭКВИВАЛЕНТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ Назаров В. В., Лепешкин А. Р.	290
АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА В МЕТОДЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ Титков В. В., Панин С. В.	291
ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ J-ИНТЕГРАЛА МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ Титков В. В., Панин С. В.	293
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ШТАМПА С ПОРИСТОЙ ПОЛУПЛОСКОСТЬЮ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫМИ СВОЙСТВАМИ В РАМКАХ МОДЕЛИ БИО С ПОВЕРХНОСТНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ Данильченко С. А., Колосова Е. М., Наседкин А. В., Наседкина А. А.	295
КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СФЕРИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТОВ ЧЕРЕЗ АНТИФРИКЦИОННУЮ ПРОСЛОЙКУ Каменских А. А., Панькова А. П.	296
ДИАГНОСТИКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗУБНОГО РЯДА ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЧЕРЕЗ ЗАЩИТНЫЕ ЗУБНЫЕ ШИНЫ Каменских А. А., Устюгова Т. Н., Авдеева Е. С.	298
КЛИНИЧЕСКАЯ И ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭЛАСТОГРАФИИ В НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ФИБРОЗА СЕЛЕЗЕНКИ У БОЛЬНЫХ ХРОНИЧЕСКИМ ГЕПАТИТОМ С Чернов В. С., Патлусов Е. П.	299

РАЗЛИЧИЯ В ПЬЕЗОМОДУЛЯХ ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТОВ В ПОРИСТЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПОР	300
Наседкин А. В., Наседкина А. А., Нассар М. Э., Раджагопал А.	
ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА РЕНТЕГНОВСКИМИ МЕТОДАМИ	302
Андреев П. В., Гудзь Д. А., Сметанина К. Е.	
ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ	304
Адамов А. А., Каменских А. А., Носов Ю. О.	
ПИЛОТНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНОЙ GERONТОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАЦИЕНТОВ СТАЦИОНАРА КРУГЛОСУТОЧНОГО ПРЕБЫВАНИЯ GERONТОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ	306
Попов А. А., Беломестнов М. С., Исакова Е. В.	
ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЯЧЕЙСТЫХ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЛП	307
Муканов Г. Ж.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ ТИТАНОВЫХ ЯЧЕЙСТЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МКЭ	309
Муканов Г. Ж.	
О НЕКОТОРЫХ МЕХАНОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР	311
Наймарк О. Б.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО СЕТЧАТОГО СТЕРЖНЕВОГО ЭЛЕМЕНТА	312
Буров А. Е., Иванов В. А.	
ЛОКАЛЬНАЯ ЗАКАЛКА ПРОБИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ	313
Веремейчик А. И., Сазонов М. И., Хвисевич В. М.	
СТРУКТУРА МЕТАЛЛА ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 30ХГСН2А С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ	314
Демьтеев В. Б., Засыпкин А. Д., Мокрушина М. И.	
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ	316
Миховски М. М.	
СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ КОБАЛЬТОВЫХ СПЛАВОВ	317
Давыдов Д. И., Казанцева Н. В., Пацелов А.М., Попов Н. А.	
MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES THROUGH DIGITAL IMAGE CORRELATION	319
Stoilov G., Pashkouleva D., Kavardzhikov V.	
ГРАДИЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ УСЛОВИИ КВАДРАТИЧНОГО НАГРЕВА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ СЛОЯ	320
Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю.	

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ В СВЧ-ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ПАРАМЕТРЫ ВИБРОВолНОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ УДАРОМ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ Злобина И. В., Бекренев Н. В., Кацуба И. С.	322
РАЦИОНАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ ЯЧЕЕК ВАЛКОВОГО ПРЕССА Полянский Л. И., Бабайлов Н. А., Логинов Ю. Н.	324
ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО УЛЬТРАЗВУКА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА КАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ Казанцева Е. А., Комарова Е. Г., Шаркеев Ю. П.	326
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РОГОВИЦЫ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА Спевак Л. Ф., Бабайлов Н. А.	327
АНАЛИЗ НЕОДНОМЕРНЫХ СДВИГОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.	328
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ В СДВИГОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.	329
СВОЙСТВА ИЗОБАР СДВИГОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.	330
ОДНОНАПРАВЛЕННОЕ КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ПРИ УЧЕТЕ УСЛОВИЯ ИДЕАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ Бурмашева Н. В., Ларина Е. А., Просвиряков Е. Ю.	331
ОДНОНАПРАВЛЕННОЕ СЛОИСТОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОМ СЛОЕ ПРИ УЧЕТЕ УСЛОВИЯ ИДЕАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ, ИНДУЦИРОВАННОЕ НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ Бурмашева Н. В., Ларина Е. А., Просвиряков Е. Ю.	333
ДИФФУЗИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ ПУАЗЕЙЛЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ БИНАРНОЙ ЖИДКОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.	335
КРУПНОМАСШТАБНОЕ КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.	336
НЕОДНОРОДНОЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА-ПУАЗЕЙЛЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.	337

НЕОДНОРОДНОЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА–ПУАЗЕЙЛЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.	338
НЕСТАЦИОНАРНАЯ СЛОИСТАЯ КОНВЕКЦИЯ БЕНАРА–МАРАНГОНИ ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ НЬЮТОНА–РИХМАНА Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.	339
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛА ЭКМАНА ДЛЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ГРАНИЧНОГО УСЛОВИЯ НАВЬЕ Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.	340
ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МЕХАНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ВТ-6, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ SLM-ПЕЧАТИ Панин С. В., Еремин А. В., Бурков М. В., Любутин П. С., Бяков А. В.	341
ОБРАЗЕЦ ДЛЯ КОРРЕКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА Татусь Н. А., Полилов А. Н., Власов Д. Д., Жавыркин В. В.	343
МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВОЙ ТЕЧЕНИЯ СТАЛИ 08ПС С ЯВНЫМ УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА НА МЕЗОУРОВНЕ Чирков А. О., Еремин М. О., Надежкин М. В.	344
ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ТИПА КУЭТТА ПРИ УСЛОВИИ НАГРЕВА ГРАНИЦЫ ЖИДКОСТИ Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю.	345
О ВЛИЯНИИ ГРАДИЕНТНЫХ ЭФФЕКТОВ ДАВЛЕНИЯ НА ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ В ТРЕХМЕРНОМ КОНВЕКТИВНОМ ТЕЧЕНИИ Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю.	346
УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА БИОИНЕРТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, ЦИРКОНИЯ И НИОБИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ Майрамбекова А. М., Банников М. В., Оборин В. А., Терехина А. И., Ерошенко А. Ю., Наймарк О. Б., Шаркеев Ю. П.	348
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПУЧИВАНИЯ БАЛКИ ВСЛЕДСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ Радченко В. П., Афанасьева О. С., Глебов В. Е.	349
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ В ПРОЦЕССЕ АВТОКЛАВНОГО ФОРМОВАНИЯ Ильиных Г. В., Сметанников О. Ю.	350
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНО ПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ И ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ Радченко В. П., Павлов В. Ф., Бербасова Т. И.	351
АНАЛИЗ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ АНИЗОГРИДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ Шатов А. В., Буров А. Е., Лопатин А. В.	353

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ЗТА-КОМПОЗИТА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ Коробенков М. В.	354
ПРОБЛЕМА РАЗНОТОЛЩИННОСТИ В ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ Круглов А. А., Лутфуллин Р. Я., Мурзина Г. Р., Еникеев Ф. У.	356
ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ Сметанников О. Ю., Сахабутдинова Л. Р.	357
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛОШНЫХ И ОБЪЕМНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ, В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ 102–103 С–1 Гармашев А. Ю., Смирнов Е. Б., Петухов Е. А., Кленов А. И., Сидоров К. С., Шестириков М. А., Юсупов Д. Т., Завьялов З. И., Борцов А. А.	359
О ВЛИЯНИИ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКНА ТИПА PANDA Лесникова Ю. И., Труфанов А. Н.	360
ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОГО ПРИПОЯ ПО СЕРЕБРЯНОЙ ОСНОВЕ ПСР-72 ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ Шестириков М. А., Юсупов Д. Т., Коваль А. В., Кадочников Д. Ю., Деменев А. С.	362
ИЗУЧЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ В ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПОСРЕДСТВОМ РЕГИСТРАЦИИ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ И ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДВУМ НЕЗАВИСИМЫМ МЕТОДАМ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРЕГРАДЕ ИЗ МРАМОРА И ФТОРИДА ЛИТИЯ Юсупов Д. Т., Сидоров К. С., Кленов А. И., Ширококов А. Е., Комаров Р. В., Петровцев А. В., Шалковский Д. М.	363
АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ Столбовский А. В., Фалахутдинов Р. М., Мурзинова С. А., Истомина А. Ю.	364
STUDING THE CAUSES FOR THE DESTRUCTION OF SHUTOFF EQUIPMENT IN WATER SUPPLY SYSTEMS ON UPPER FLOORS OF HIGH-RISE APARTMENT BUILDINGS Antimonov A. M., Pushkareva N. B.	366
НОВЫЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ ХРОМО-МАРГАНЦЕВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ Ляшков К. А., Шабашов В. А., Козлов К. А., Заматовский А. Е., Катаева Н. В.	367
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В КОМПОЗИТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ Третьякова Т. В., Третьяков М. П., Зубова Е. М.	368
ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СРЕД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ Панфилов П. Е., Панфилов Г. П., Зайцев Д. В., Кисеев В. М.	370

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ Шимов Г. В., Бушуева Н. И.	371
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ЛОПАТКАХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ Трофимов В. Н., Пьянков И. Н., Пьянков В. А.	373
ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБНОЙ СТАЛИ 08Г2Б ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ Горкунов Э. С., Поволоцкая А. М., Задворкин С. М., Путилова Е. А., Мушников А. Н., Крючева К. Д.	374
МЕХАНИЗМ РОСТА ТРЕЩИНЫ В ДЕНТИНЕ ЧЕЛОВЕКА ПРИ СЖАТИИ Зайцев Д. В., Funk A., Waske A.	375
СПЕКТР ЧАСТОТ МИКРО- И НАНОРЕЗОНАТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМИ ОТ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ КРОМКАМИ Хакимов А. Г.	376
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА В95 В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ Смирнов А. С., Коновалов А. В., Канакин В. С.	378
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА АМГ6/10 % SiC В УСЛОВИЯХ НЕМОНОТОННОГО НАГРУЖЕНИЯ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЕФОРМАЦИЙ Смирнов А. С., Коновалов А. В.	380
ВЛИЯНИЕ МЕТОДИКИ ПРОБОПОДГОТОВКИ ПОРОШКА КАРБИДА ТИТАНА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Канакин В. С., Смирнов А. С.	382
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОДБИВКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО БАЛЛАСТА НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ПУТЕВЫХ МАШИН Манаков А. Л., Игумнов А. А.	383
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ Горячева И. Г.	385
ВИБРОДИАГНОСТИКА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ Шардаков И. Н., Глот И. О., Шестаков А. П., Цветков Р. В., Епин В. В., Гусев Г. Н.	386
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ Феклистова Е. В., Вильдеман В. Э.	387
НАБЛЮДЕНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОГО СПЛАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ НЕРАСТВОРИМЫХ КОМПОНЕНТОВ ЗОЛОТО–КОБАЛЬТ IN SITU ПО ИЗМЕНЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА Толмачев Т. П., Пилюгин В. П., Пацелов А. М.	388
КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ Стрижак В. А., Волкова Л. В., Хасанов Р. Р., Ефремов А. Б.	389

ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНО ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ТРУБНОЙ СТАЛИ 09Г2С НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ, ЦИКЛИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ Власов И. В., Сурикова Н. С., Панин С. В., Максимов П. В., Яковлев А. В., Гоморова Ю. П., Моисеенко Д. Д.	390
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ В УСЛОВИЯХ ИНДЕНТИРОВАНИЯ Смирнов С. В., Мясникова М. В., Мичуров Н. С., Игумнов А. С.	393
ВЫСОКОПРОЧНЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ ПЭЭК, ПФС, ПИ Панин С. В., Корниенко Л. А., Алексенко В. О., Буслович Д. Г., Бочкарева С. А., Нгуен Дык Ань, Донцов Ю. В., Ло Цзянкунь, Ле Тхи Ми Хиен	394
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ УДАРНО-ТЯГОВОГО УСТРОЙСТВА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ МЕТОДАМИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МЕТАЛЛОВ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ Игумнова Т. В., Бехер С. А.	395
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО ОБРАЗЦА НА РАЗРЫВ МЕЖДУ СЛОЕВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОГЕЗИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Вильдеман В. Э., Мугатаров А. И.	397
УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА С ЖЕСТКИМ ТЕЛОМ КАК ЭЛЕМЕНТАХ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ Чертова Н. В.	399
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	401

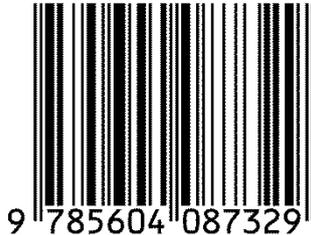
Научное издание

Международная конференция
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»
сборник материалов (Екатеринбург, 09–13 ноября 2020 г.)

Рекомендовано к изданию
Ученым советом ИМАШ УрО РАН

Ответственный за выпуск *Худорожкова Ю.В.*
Компьютерная верстка *Гариева А.В.*
Редактор: *И.М. Циклина*
Редактор англ. текста: *Е.Е. Верстакова*
Корректор: *Г.В. Торлопова*

ISBN 978-5-6040873-2-9



Подписано в печать 02.11.2020. Формат 60×84 1/16
Бумага писчая. Печать на ризографе. 43,00 п.л.
Тираж 300 экз.

Оригинал-макет изготовлен в
Научно-редакционном отделе ИМАШ УрО РАН
620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

Отпечатано в типографии

ООО «Издательство УМЦ УПИ»
г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2
Тел.: (343) 362-91-16