



**ИФПМ**

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

Сборник материалов  
(Екатеринбург, 27–31 мая 2024 г.)

Екатеринбург  
ИМАШ УрО РАН  
2024

УДК 620.17+620.16:620.18+620.19:620.179

ББК 34

XVIII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: сб. материалов (Екатеринбург, 27–31 мая 2024 г.). – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2024. – 230 с. – ISBN 978-5-6040873-4-3.– Режим доступа: <https://www.imach.uran.ru/Conf2024/about/>

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

Сборник адресован специалистам различных научных специальностей: механиков, физиков, материаловедов и т. д., а также представителям промышленности, что объясняется междисциплинарным характером опубликованных докладов

**Издается в авторской редакции. Ответственность за содержание и оформление представленных материалов несут авторы.**

ISBN 978-5-6040873-4-3



9 785604 087343

© ИМАШ УрО РАН, 2024 г.  
© Авторы, 2024 г.

## Организаторы конференции:

МИНОБРНАУКИ России, УрО РАН, Технический комитет 17 (Неразрушающая оценка) Европейского общества структурной целостности (ESIS), Российский комитет ESIS, ИМАШ УрО РАН, ИФМ УрО РАН, ИФПМ СО РАН, ИМСС УрО РАН.

## СПОНСОРЫ:



## МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:

### Сопредседатели оргкомитета:

Александар Седмак, *Белград, Сербия*

Сергей Смирнов, *Екатеринбург, Россия*

### Заместитель председателя

### организационного комитета:

Владимир Швейкин, *Екатеринбург, Россия*

### Члены ОРГКОМИТЕТА:

Батаев А. А., *Новосибирск, Россия*

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

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

Вухерер Т., *Марибор, Словения*

Горячева И. Г., *Москва, Россия*

Дегтярь В. Г., *Миасс, Россия*

Колубаев Е. А., *Томск, Россия*

Ломакин Е. В., *Москва, Россия*

Макаров А. В., *Екатеринбург, Россия*

Матвеев В. П., *Пермь, Россия*

Матвиенко Ю. Г., *Москва, Россия*

Мену А., *Касабланка, Марокко*

Миронов В. А., *Екатеринбург, Россия*

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

Москвичев В. В., *Красноярск, Россия*

Мулюков Р. Р., *Уфа, Россия*

Панин С. В., *Томск, Россия*

Плехов О. А., *Пермь, Россия*

Сундер Р., *Бангалор, Индия*

Сясько В. А., *Санкт-Петербург, Россия*

Фомин В. М., *Новосибирск, Россия*

Ченцов А. Г., *Екатеринбург, Россия*

Шлянников В. Н., *Казань, Россия*

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

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ:

### Председатель программного комитета:

Евгений Просвираков, *Екатеринбург, Россия*

### Члены комитета:

Батаев И. А., *Новосибирск, Россия*

Берестова С. А., *Екатеринбург, Россия*

Буров С. В., *Екатеринбург, Россия*

Гладковский С. В., *Екатеринбург, Россия*

Дементьев В. Б., *Ижевск, Россия*

Коновалов А. В., *Екатеринбург, Россия*

Костин В. Н., *Екатеринбург, Россия*

Наймарк О. Б., *Пермь, Россия*

Поволоцкая А. М., *Екатеринбург, Россия*

Пугачева Н. Б., *Екатеринбург, Россия*

Радченко В. П., *Самара, Россия*

Соболева Н. Н., *Екатеринбург, Россия*

Трусов П. В., *Пермь, Россия*

Худорожкова Ю. В., *Екатеринбург, Россия*

## ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ:

### Председатель

Иван Каманцев, *Екатеринбург, Россия*

### Секретарь конференции

Евгения Путилова, *Екатеринбург, Россия*

### Члены комитета

Привалова В. В.

Фатыхова Е. В.

Крючева К. Д.

Веселова В. Е.

Асабин К. А.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МАКРОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АВИАЦИОННОГО СПЛАВА АМг5, МО-ДИФИЦИРОВАННОГО ПОРОШКОМ ВОЛЬФРАМАТА ЦИРКОНИЯ <math>ZrW_2O_8</math> ПРИ ФРИКЦИОННОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ</b>	21
Судариков А. В., Чумаевский А. В., Колубаев Е. А.	
<b>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ</b>	22
Мокрицкий Б. Я., Непогожев А. А.	
<b>СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В БИНАРНОМ ЭКВИАТОМНОМ СПЛАВЕ <math>Ni_{50}Mn_{50}</math> ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ СТАРЕНИИ</b>	23
Белослудцева Е. С., Винокуров Д. Е., Царигородцева А. А.	
<b>РАНЖИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА СЪЕМНЫХ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ</b>	24
Грачев Д. И., Панин С. В., Степанов Д. Ю., Козулин А. А., Арутюнов С. Д.	
<b>DEFORMATION AND FRACTURE OF DENDRITIC STRUCTURES FORMED DURING WIRE-FEED ELECTRON-BEAM ADDITIVE MANUFACTURING OF AL-SI ALLOY</b>	25
Balokhonov R. R., Utyaganova V. R., Gatiyatullina D., Romanova V. A.	
<b>ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТИПОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОЛТЮБИНГОВЫХ ТРУБ</b>	26
Порошин В. Б., Уфимцев А. Н.	
<b>КОСВЕННАЯ ДИАГНОСТИКА ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ФАКТОРОВ, ПРОЦЕССОВ И ОТКАЗОВ</b>	27
Мазур Е. В., Великанов Н. Л.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА РЕШЕТЧАТЫХ СКАФФОЛДОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ</b>	28
Пирогова Ю. В., Ташкинов М. А., Виндокуров И. В., Еленская Н. В., Шалимов А. С., Тарасова А. С.	
<b>НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОТСЛОЕНИЯ КРУГОВОЙ ПЛАСТИНЫ ОТ ПОДЛОЖКИ</b>	29
Гандилян Д. В., Устинов К. Б.	
<b>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ПОДВИЖНЫМИ СТЕНКАМИ</b>	30
Квашнин А. Е., Потянихин Д. А.	
<b>ОДНО АВТОМОДЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ С ОСОБЕННОСТЬЮ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ</b>	31
Казаков А. Л., Спевак Л. Ф.	
<b>ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВИБРОНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДОРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИИ ТУРБИНОЙ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ</b>	32
Пивоварова М. В., Нихамкин М. Ш.	

<b>ПРОГРАММА ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДИФФУЗИИ РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ</b>	34
Нефедова О. А., Спевак Л. Ф.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ</b>	35
Емельянов И. Г., Кислов А. Н.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ ОТВЕРЖДАЮЩЕЙСЯ ЭПОКСИДНОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ</b>	36
Колчанов Н. М., Гилёв В. Г., Русаков С. В.	
<b>О ПРИМЕНЕНИМОСТИ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ</b>	37
Пулин А. А.	
<b>ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ОБЛУЧЕННОЙ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА ПО ИСПЫТАНИЯМ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ</b>	38
Карагерги Р. П., Козлов А. В., Коновалов А. В.	
<b>О СВЯЗИ АВТОВОЛНОВЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	39
Надежкин М. В., Баранникова С. А.	
<b>РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПРИ ОДНООСНОМ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	40
Махутов Н. А., Макаренко И. В., Макаренко Л. В.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА С 10 ОБ.% НАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ЧАСТИЦ SiC</b>	41
Вичужанин Д. И., Смирнов С. В., Пугачева Н. Б., Нестеренко А. В., Поляков П. А.	
<b>ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ЭВТЕКТИКИ В АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННОМ СПЛАВЕ AlSi12</b>	42
Землянов А. В., Гатиятулина Д. Д., Балохонов Р. Р., Утяганова В. Р.	
<b>ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И СОДЕРЖАНИЯ БОРА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ</b>	43
Дударева А. А., Бушуева Е. Г.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШАРОВ В УЗЛЕ ТРЕНИЯ ЧЕТЫРЕХШАРИКОВОЙ МАШИНЫ</b>	44
Антимонов А. М., Пушкарева Н. Б.	
<b>ВОЗМОЖНОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СТРУКТУР СПЛАВА Fe-3%Si</b>	45
Драгошанский Ю. Н., Пудов В. И., Поволоцкая А. М.	

<b>МОДЕЛИ, ПАРАМЕТРЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ К МАТЕРИАЛАМ И ЭЛЕМЕНТАМ КОНСТРУКЦИЙ</b>	46
Туманов А. В., Шлянников В. Н.	
<b>ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ТЕЛАХ С ТРЕЩИНАМИ, СВОЙСТВА КОТОРЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫ К ВИДУ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ</b>	47
Ломакин Е. В., Королькова О. П.	
<b>МЕХАНИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА КАРБОНИЗИРОВАННОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИУРЕТАНА ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ</b>	48
Иванов Я. Н., Чудинов В. С., Шардаков И. Н., Беляев А. Ю., Морозов И. А.	
<b>ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ</b>	49
Зыкова А. П., Панфилов А. О., Воронцов А. В., Тарасов С. Ю.	
<b>ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО АРМИРОВАНИЯ</b>	50
Власов Д. Д., Татусь Н. А.	
<b>ЗАДАЧА МАРШРУТИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ (МИНИМАКСНАЯ ПОСТАНОВКА)</b>	51
Ченцов А. Г., Ченцов П. А.	
<b>ХАРАКТЕР АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ КОМПОЗИТОВ ZrV2-SiC-TaV2 С ГОМОГЕННОЙ И ДВОЙНОЙ СТРУКТУРОЙ</b>	53
Шмаков В. В., Буяков А. С., Буякова С. П.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТЕЧЕНИЯ РАЗРЯЖЕНИЯ ТИПА ДВОЙНОЙ ВОЛНЫ ПРИ РАЗЛЕТЕ ГАЗА В ВАКУУМ НА КОСОЙ СТЕНКЕ В НЕСОГЛАСОВАННОМ СЛУЧАЕ</b>	54
Понькин Е. И.	
<b>КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ В ОЧАГЕ ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА</b>	55
Баранникова С. А., Колосов С. В., Исхакова П. В.	
<b>ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ</b>	56
Пухова Е. А., Батыров Б. Б., Бушуева Е. Г.	
<b>АКУСТОПОВРЕЖДЕННОСТЬ ПРИ НАКОПЛЕНИИ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ</b>	57
Полянский В. А., Беляев А. К., Яковлев Ю. А.	
<b>ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ</b>	58
Радченко В. П., Саушкин М. Н.	
<b>ИЗЛОМ ТРАЕКТОРИИ И ВЕТВЛЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ПРИ СМЕШАННОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	59
Кургузов В. Д.	

<b>ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАКОВУЮ ОПУХОЛЬ В КОСТНОЙ ТКАНИ</b>	60
Еремина Г. М., Смолин А. Ю.	
<b>ВЛИЯНИЕ ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ НА СКРУЧИВАНИЕ СТЕРЖНЯ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА ПРИ ЕГО СЖАТИИ</b>	61
Ахметшин Л. Р.	
<b>СКРУЧИВАНИЕ ЯЧЕЙКИ МЕТАМАТЕРИАЛА С ТОПОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ</b>	62
Ахметшин Л. Р., Казанцева Е. А., Иохим К. В.	
<b>ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ. ТОЧЕЧНЫЙ НАГРЕВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	63
Ахметханов Р. С.	
<b>ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ. УДАРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	64
Ахметханов Р. С.	
<b>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА МОРФОЛОГИЮ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ ХРОМ-БОР</b>	65
Батыров Б. Б., Пухова Е. А., Бушуева Е. Г.	
<b>ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н9Т МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО – ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ</b>	66
Андрюшкина В. Е., Пухова Е. А., Бушуева Е. Г.	
<b>ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРНОГО ВОДОРОДНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В НЕФТЕХИМИИ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ</b>	67
Нечаева А. В., Шалагаев В. В., Полянский В. А.	
<b>КОМПОЗИТЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПУАССОНА: АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ НА СТЕПЕНЬ АУКСЕТИЧНОСТИ</b>	68
Тарасова А. С., Ташкинов М. А., Виндокуров И. В.	
<b>ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА <math>Cu/TiC + TiB_2</math> ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ</b>	69
Пугачева Н. Б., Быкова Т. М.	
<b>ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ ПОЛЕЙ РАЗРУШЕНИЯ</b>	70
Косов Д. А., Туманов А. В., Шлянников В. Н.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЛСТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ ПРИ ОДНОСТОРОННЕЙ ЗАКАЛКЕ: РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ</b>	71
Салихова Н. К., Дудин Д. С., Келлер И. Э., Гачегова Е. А., Максимов А. Б.	
<b>ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ СДВИГОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КАК РЕЗУЛЬТАТА САМООРГАНИЗОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЕ МАТЕРИАЛОВ</b>	72
Соковиков М. А., Симонов М. Ю., Чудинов В. В., Оборин В. А., Уваров С. В., Наймарк О. Б.	

<b>ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА НА РАЗВИТИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ И НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЕЙ</b>	73
Синев И. О., Белецкий Е. Н., Левин В. П., Ботвина Л. Р.	
<b>ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРАЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ С ГРАНИЦАМИ ЗЕРЕН В РАМКАХ ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ</b>	74
Курмоярцева К. А.	
<b>НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА-КУЭТТА ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ</b>	75
Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.	
<b>ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА–КУЭТТА ПРИ НАЛИЧИИ МАЛОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ</b>	76
Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.	
<b>РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА СРОКА СЛУЖБЫ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИДОВ ЖЕЛЕЗА</b>	77
Кулевич В. П., Богданов А. И.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ Ti-Al СПЛАВОВ С НАНО СТРУКТУРОЙ</b>	78
Чепак-Гизбрехт М. В., Князева А. Г.	
<b>СИНТЕЗ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СЛОЕВ Ni-Al МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ</b>	79
Федорова Е. Н., Суходоева Н. В., Алтунин Р. Р., Самойло А. С.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРАТКОВРЕМЕННОЙ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ 15X2НМФАА МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ</b>	80
Свиридов Г. Б., Марченков А. Ю., Панькина А. А.	
<b>УПРОЧНЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ГУСЕНИЧНЫХ И КОЛЕСНЫХ МАШИН ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ С ВИНТОВЫМ ОБЖАТИЕМ</b>	81
Волков К. Г., Дементьев В. Б.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПУТЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ</b>	84
Чаплыгин К. К., Воронин С. В.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА ИЗ УУКМ С ПОВРЕЖДЕННЫМИ ОБЛАСТЯМИ ПО ОКОНЧАНИИ ПРОЦЕССА ОСТЕОИНТЕГРАЦИИ</b>	85
Разумовский Е. С., Шавшуков В. Е.	
<b>ОПИСАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦАХ ПРИ МНОГОУРОВНЕВОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ</b>	86
Котельникова Н. В., Грибов Д. С.	
<b>ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРЕСС-ПУАНСОНА НА НАПРЯЖЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ОДНООСНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ВОСКООБРАЗНОГО ПОРОШКОВОГО ТЕЛА В ЗАКРЫТОЙ МАТРИЦЕ</b>	87
Жилин С. Г., Богданова Н. А., Предеин В. В.	



<b>ДВУХУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ АДДИТИВНОГО АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВОГО СПЛАВА</b>	88
Гатиятуллина Д. Д., Землянов А. В., Балохонов Р. Р., Утяганова В. Р.	
<b>GRAIN-SCALE DEFORMATION MECHANISMS IN ADDITIVELY MANUFACTURED FCC POLYCRYSTALS</b>	89
Romanova V. A., Balokhonov R. R., Lychagin D. V., Pisarev M.	
<b>ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИМПЛАНТАТОВ ИЗ ПОРИСТОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА И КОСТНЫХ ТКАНЕЙ ПОЗВОНКОВ ПРИ ЗАМЕЩЕНИИ МЕЖПОЗВОНОЧНОГО ДИСКА</b>	90
Ветрова А. В., Чайковская Т. В.	
<b>РАСЧЕТ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПОЛИМЕРНЫХ ТКАНЕВЫХ КОМПОЗИТОВ С ПОМОЩЬЮ ЛОКАЛЬНОГО ТРЁХМЕРНОГО АРМИРОВАНИЯ (ФЕЛТИНГА)</b>	91
Форенталь Г. А., Сапожников С. Б.	
<b>ОЦЕНКА АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ НИКЕЛЯ</b>	92
Богданов А. И., Кулевич В. П., Евчиц Р. Д.	
<b>ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ИНЕРТНОМ ГАЗЕ (TIG) АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ (AL-ZN-MG-CU)-TiC</b>	93
Спирина И. А., Смирнов А. С., Канакин В. С.	
<b>ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАТАНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1545К</b>	94
Никитина М. А., Песин А. М., Носов Л. В., Барышникова А. М., Песин И. А.	
<b>МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ В95, АРМИРОВАННОЙ КАРБИДАМИ КРЕМНИЯ И ТИТАНА</b>	95
Канакин В. С., Смирнов А. С., Спирина И. А.	
<b>КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ</b>	96
Школина Д. И., Шляхтенков С. П., Бехер С. А., Бобров А. Л.	
<b>ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ И ТИТАНОВОГО СПЛАВА</b>	97
Сенаева Е. И., Пугачева Н. Б., Макаров А. В.	
<b>ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННОМ СИЛУМИНЕ НА МИКРОУРОВНЕ</b>	98
Бородина А., Дымнич Е. М., Романова В. А.	
<b>THE EFFECT OF SCANNING STRATEGY ON GRAIN STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF PBF-LB STAINLESS STEEL 316L</b>	99
Emelianova E. S., Pisarev M., Zinovieva O., Zinoviev A., Romanova V. A., Balokhonov R. R.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ЦЕПОЧКУ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛИ МАРКИ 20X13</b>	100
Песин А. М., Пустовойтов Д. О., Цатурянц М. С., Носов Л. В., Песин И. А., Бахчеев А. Д.	

<b>МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ СПЛАВА Ti6Al4V С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ Cu, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ АДДИТИВНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ</b>	101
Николаева А. В., Зыкова А. П.	
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПРЕТЕРПЕВШИХ ВЗРЫВНОЕ ОБЖАТИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШАРОВ</b>	102
Юсупов Д. Т., Гармашев А. Ю., Кучко Д. П., Дегтярев А. А., Петровцев А. В., Шалковский Д. М.	
<b>EXPERIMENTAL RESULTS OF EVALUATING RESIDUAL ENERGY OF EXPLOSIVE-COMPACTED METAL SPHERES</b>	
Yusupov D. T., Garmashev A. Yu., Kuchko D. P., Degryaryov A. A., Petrovtsev A. V., Shalkovskiy D. M.	
<b>РАЗРАБОТКА РЕСТОРАТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТОМАТОЛОГИИ</b>	103
Панфилов П. Е., Коровин Р. Д., Кабанова А. В., Меженев М. Е., Зайцев Д. В.	
<b>ДИСКРЕТНАЯ УЛЬТРАСТРУЙНАЯ ДИАГНОСТИКА ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ</b>	104
Галиновский А. Л.	
<b>ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ</b>	105
Плехов О. А., Бартоломей А. Л., Вшивков А. Н., Гачегова Е. А., Манухина К. Д.	
<b>ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА МЕЖСЛОЙНЫХ ГРАНИЦАХ В СЛОИСТОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ</b>	106
Крючков Д. И., Каманцев И. С., Швейкин В. П.	
<b>ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕКСТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПУТЕМ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ</b>	107
Урцев Н. В., Кузьмина А. В.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОЙ ПЛАСТИНЫ</b>	108
Ширяев А. А., Карманов В. В.	
<b>ПОВРЕЖДЕННОСТЬ АДДИТИВНОЙ СТАЛИ 316L В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО И ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ</b>	109
Белецкий Е. Н., Левин В. П., Синев И. О., Ботвина Л. Р.	
<b>ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ МАРТЕНСИТНЫХ ВАРИАНТОВ В МАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПОЛЯХ В ФЕРРОМАГНИТНОМ СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ</b>	110
Роговой А. А., Столбова О. С.	
<b>МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИТОВ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕЧАТИ</b>	111
Волкова О. Ю.	

<b>ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ СРЕДСТВАМИ ТЕНЗОМЕТРИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОМ И МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	112
Бехер С. А., Выплавень В. С., Попков А. А., Гуляев М. А., Шляхтенков С. П.	
<b>ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО ОБЪЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА СОСТАВА <math>ZrHfTiAlCoNiCu</math>, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ</b>	113
Насенник И. Е.	
<b>ВИБРАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ МОСТА «ВЛЮБЛЕННЫХ» В ТЮМЕНИ. ВТОРОЙ ЭТАП</b>	114
Муратов К. Р., Лихачев Д. А., Соколов Р. А., Осинцева М. А.	
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ КРУГОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ НОВОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ПОРОГОВЫХ УСЛОВИЙ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ</b>	115
Сундер Р.	
<b>ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ЗАДЕЛКИ НИТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПЕЧАТАННЫХ КОМПОЗИТОВ</b>	116
Власов Д. Д., Плугатарь Т. П., Поляков А. Э., Татусь Н. А.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ МОДУЛЯ СДВИГА ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ</b>	117
Поляков А. Э., Татусь Н. А., Власов Д. Д.	
<b>МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНОГО ПОЛИМЕРА</b>	118
Русаков С. В., Рахманов А. Ю.	
<b>УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЛЬСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН</b>	119
Гончаров К. И., Бобров А. Л.	
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ К ОБРАЗОВАНИЮ НАРОСТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЕЧНЫХ РОЛИКОВ</b>	120
Берсенев К. А., Пузанов М. П., Чернов А. А., Коробов Ю. С., Каренина Л. С., Худорожкова Ю. В., Макаров А. В., Давыдов Д. И., Кинжебаева Г. М.	
<b>МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ</b>	121
Романов К. А., Швейкин А. И., Трусов П. В.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА В БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЕ, ПОДВЕРГНУТОЙ КЛИМАТИЧЕСКОМУ СТАРЕНИЮ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО КЛИМАТА</b>	122
Гаврильева А. А., Лебедев М. П., Кычкин А. К., Кротов А. С., Старцев О. В.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОУРОВНЕВОГО ПОДХОДА</b>	123
Кондратьев Н. С., Подседерцев А. Н., Балдин М. Н., Безверхий Д. С.	

<b>МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, КОМПЛЕКСНО УЧИТЫВАЮЩАЯ ТЕМПЕРАТУРУ И СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ</b>	124
Вшивкова А. А., Швейкин А. И.	
<b>СТАТИСТИЧЕСКИЙ БУТСТРЕП КАК СРЕДСТВО ВЫЧИСЛЕНИЯ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ЦИФРОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ</b>	125
Гадолина И. В.	
<b>MODELLING THE DYNAMIC RESPONSE OF A HIERARCHICALLY STRUCTURED BAMBOO BEAM CONSIDERING TENSION-COMPRESSION ASYMMETRY</b>	126
Rezazadeh Ghader, Jahangiri Reza	
<b>ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА С ФИКСАЦИЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	127
Жихарев М. В., Сапожников С. Б.	
<b>ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ В4С-CrB2, ПОЛУЧЕННОЙ РЕАКЦИОННЫМ ГОРЯЧИМ ПРЕССОВАНИЕМ</b>	128
Филиппов А. А., Дик Д. В., Бурхинова Н. Ю.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРОШКОВЫХ ДОБАВОК TiC В ПОКРЫТИИ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА</b>	129
Шекшеев М. А.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОЛИСТОВОМ ПРОКАТЕ МЕТОДОМ НАРАЩИВАНИЯ УЗКОГО ВЫРЕЗА</b>	130
Одинцев И. Н., Плугатарь Т. П.	
<b>ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ</b>	131
Хорошевский К. А., Ерпалов А. В., Гадолина И. В.	
<b>РАССЛОЕНИЕ КОМПОЗИТНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ</b>	132
Волкова О. Ю., Дмитриев Н. В.	
<b>ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ И КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ</b>	133
Саврай Р. А.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО БОРИДНОГО ПОКРЫТИЯ НА СТАЛИ 4X5MFC</b>	134
Быкова Т. М., Пугачева Н. Б., Сирош В. А.	
<b>ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА ПРЕССОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ</b>	135
Швейкин В. П., Калинина Н. А., Разинкин А. В., Мальцева Т. В., Салихьянов Д. Р.	

<b>УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ПУЛТРУЗИОННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ МНОГООСНОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	136
Елкин А. С., Староверов О. А., Абрамова В. В., Сергеичев И. В.	
<b>ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ УСТАЛОСТНОГО И ФРИКЦИОННОГО МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ</b>	137
Петрова И. М.	
<b>ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗОНЫ ПЛАСТИЧНОСТИ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ</b>	138
Прокопьев Л. А., Андреев Я. М., Семёнов С. О., Лукин Е. С.	
<b>ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРЕГРАДЫ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	139
Двойников Д. А., Залазинский А. Г., Нестеренко А. В., Швейкин В. П.	
<b>ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ЭПОКСИДНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ РАДИАЛЬНОМ СЖАТИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ПРИ МИНУСОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ</b>	140
Смирнов С. В., Веретенникова И. А., Вичужанин Д. И., Пестов А. В., Роговая С. А.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛИ 13X11H2B2MB-Ш</b>	141
Ганеев А. В., Хайбулина Н. А., Фрик А. А., Никитина М. А., Исламгалиев Р. К.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ВТ6 В ПРИ КВАЗИСЛУЧАЙНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	142
Бадиков К. А., Савкин А. Н., Абалхан Д. Ю., Сенцов К. И.	
<b>ВЛИЯНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ВОЛОКОН НА НЕЛИНЕЙНОСТЬ ПРОДОЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ КОМПОЗИТА</b>	143
Федулов Б. Н., Бондарчук Д. А., Ломакин Е. В.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ КОНСТАНТ И ТОЛЩИНЫ МЕЖФАЗНОЙ ЗОНЫ В СТЕКЛОПЛАСТИКАХ НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ И МАКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ</b>	144
Смирнов А. С., Смирнова Е. О., Спирина И. А.	
<b>АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЛЬСОВ ШЛИФОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ ГЛУБИНЫ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ</b>	145
Шляхтенков С. П., Бехер С. А.	
<b>СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА AISi10Mg, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ</b>	146
Дымнич Е. М., Романова В. А., Зиновьева О. С., Балохонов Р. Р.	
<b>ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЛЮБОЙ ТОЧКЕ КОНСТРУКЦИИ И ВОКРУГ ОТВЕРСТИЙ ЗАДАННОЙ ФОРМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЩЕЛЕВОЙ РАЗГРУЗКИ</b>	147
Чанышев А. И., Абдулин И. М., Белоусова О. Е., Лукьяшко О. А.	

<b>О КОСОМ ВНЕДРЕНИИ ЖЕСКОГО КЛИНА В ПЛАСТИЧЕСКУЮ СРЕДУ С УРАВНЕНИЯМИ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРАНДТЛЯ - РЕЙСА</b>	148
Чанышев А. И., Ефименко Л. Л., Белоусова О. Е., Лукьяшко О. А., Фролова И. В.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНИХ КРИТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ЗАДАЧЕ О ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВЫРАБОТКИ ЗА ПРЕДЕЛОМ УПРУГОСТИ</b>	149
Чанышев А. И., Абдулин И. М., Белоусова О. Е., Лукьяшко О. А.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ</b>	150
Иванов Д. С., Аммосов Г. С., Корнилова З. Г., Антонов А. А.	
<b>МЕТОДЫ И ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ В СРЕДНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ ЛЕНА</b>	151
Антонов А. А., Корнилова З. Г., Яковлев Ю. А., Терешкин А. Л.	
<b>ХОЛОДНОЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ МЕДНО-МАТРИЧНЫХ ПОКРЫТИЙ</b>	152
Шикалов В. С., Видюк Т. М., Лушов А. А.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ</b>	153
Банников М. В., Баяндин Ю. В., Уваров С. В., Никитюк А. С., Наймарк О. Б.	
<b>ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ НА СВЕРХМНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	154
Волосков Б. С., Сергеичев И. В.	
<b>ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ AISI 304</b>	155
Смолин И. Ю., Кузнецов В. П., Косарева А. В.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ</b>	156
Ладейщиков К. М., Карагерги Р. П., Козлов А. В.	
<b>ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПЕРЕХОДНОГО КЛАССА</b>	157
Захаров И. Н., Романенко М. Д., Баринов В. В.	
<b>ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ КОЛЛОИДНЫХ РУД В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ</b>	158
Москвитина Л. В., Москвитин С. Г.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ</b>	159
Смирнов С. В., Мясникова М. В.	
<b>ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ СВАРКИ, БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ</b>	160
Крючева К. Д., Путилова Е. А., Крылова С. Е., Приймак Е. Ю.	

<b>ВЛИЯНИЕ ДВУХОСЕВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА НЕЛИНЕЙНЫЙ ОТКЛИК ПРИ ВНУТРИСЛОЙНОМ СДВИГЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> Гусейнов К. А., Лешков Е. В., Оливенко Н. А., Кудрявцев О. А., Сапожников С. Б.	161
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЕ ВОЗДУХА В ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА</b> Цинкер М. Ю., Трусов П. В., Нурисламов В. В.	162
<b>ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ ЗАТЯЖКИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНО-РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ</b> Попков А. А., Бехер С. А., Мурованный Ю. Н., Снежков И. И.	163
<b>СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ ТКАНЕВОГО КОМПОЗИТА ПРИ ОДНОКРАТНОМ НАГРУЖЕНИИ</b> Игнатова А. В., Гусейнов К. А., Лешков Е. В.	164
<b>ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭВОЛЮЦИИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ СОСТОЯНИИ ПРИ ТРЕНИИ</b> Борисова М. З.	165
<b>РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К СОЗДАНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СПЕЧЕННЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ</b> Григорьев А. С., Шилько Е. В., Дмитриев А. И., Заболотский А. В., Андреев К.	166
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ В НИЖНИХ ДЫХАТЕЛЬНЫ ПУТЯХ ЧЕЛОВЕКА</b> Цинкер М. Ю., Кучуков А. И.	167
<b>ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕЧЕНИЙ МИКРОПОЛЯРНЫХ ВЯЗКИХ НЕСЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ</b> Просвиряков Е. Ю.	168
<b>МЕХАНИЧЕСКАЯ РАЗГРУЗКА МЕДИАЛЬНОЙ ЧАСТИ КОЛЕННОГО СУСТАВА – ПОИСК НОВОГО МЕТОДА</b> Жилияков А. В., Волокитина Е. А., Каманцев И. С., Кузнецов А. В., Друкаренко Н. А., Пестов А. В.	169
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО СТАРЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ NI-CR-MO</b> Гибадуллина А. Ф., Хогинов В. А., Половов И. Б.	170
<b>ВЛИЯНИЕ НИЗКОМОДУЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ h-BN НА СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ TiB<sub>2</sub>-ZrB<sub>2</sub>-SiC</b> Лукьянец М. П., Буяков А. С., Буякова С. П.	171
<b>РАЗРУШЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (СГ-П0.5 И Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ С СОХРАНЕНИЕМ ФРАГМЕНТОВ</b> Банникова И. А., Савельева Н. В., Банников М. В., Уваров С. В.	172
<b>МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВС-КОМПОЗИТА СИСТЕМЫ Fe-Ti-Ni-B-C</b> Нохрина А. В., Пугачева Н. Б.	173

<b>СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИТОВ С АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ</b>	174
Черкасова Т. С., Гладковский С. В., Саврай Р. А., Петрова С. В.	
<b>АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТИПА ТОРНАДО</b>	175
Казачинский А. О., Крутова И. Ю.	
<b>ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА</b>	176
Шарапова В. А., Максимова Т. А., Рябухин О. В., Швейкин В. П., Иванов В. Ю.	
<b>ПОВЫШЕНИЕ АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ ГРАФИТИЗИРОВАННОЙ СТАЛИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАКАЛКОЙ</b>	177
Шарапова В. А., Филиппов М. А., Швейкин В. П., Фурман И. Е.	
<b>ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ВОЗДУХА В ВОЗДУХОПРОВОДЯЩИХ ПУТЯХ ЧЕЛОВЕКА</b>	178
Цинкер М. Ю., Свинцова П. Д.	
<b>СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА ПРИ 700 °С</b>	179
Литовченко И. Ю., Аккузин С. А., Полехина Н. А., Спиридонова К. В., Осипова В. В., Ким А. В., Чернов В. М.	
<b>СКВОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В I-II РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ С ВВОДОМ В МОДЕЛЬ СУБСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА</b>	180
Ключанцев В. С., Шутов А. В.	
<b>УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 20X13 ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ</b>	181
Кузнецов В. П., Воронцов И. А., Хадыев М. С. Параскивая Е. О., Сергеев А. В., Гончаров Д. С.	
<b>ВОДОРОДНАЯ ДИАГНОСТИКА СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	182
Яковлев Ю. А., Логинов В. П., Полянский А. М.	
<b>ОБРАЗОВАНИЕ МИКРОДЕФЕКТОВ В ГЕОМАТЕРИАЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ</b>	183
Бунин И. Ж., Кочанов А. Н.	
<b>МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ: ПРИМЕНЕНИЕ К ОПИСАНИЮ ФОРМИРОВАНИЯ МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРЫ</b>	184
Подседерцев А. Н., Трусов П. В., Кондратьев Н. С.	
<b>АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ РЕШЕТЧАТЫХ СТРУКТУР ДЛЯ КРЫЛА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА</b>	185
Федоренко А. Н., Федулов Б. Н., Юргенсон С. А., Ломакин Е. В.	



<b>МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГТД НА ПТИЦЕСТОЙКОСТЬ</b>	186
Лепешкин А. Р., Аунг К. М.	
<b>ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СЛОЖНОГО НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГЦК-МЕТАЛЛОВ</b>	187
Грибов Д. С., Трусов П. В., Митрополит И. Ю.	
<b>ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ</b>	188
Буров А. Е.	
<b>ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ КАРБИДОВ В МИКРОСТРУКТУРЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ</b>	189
Соболева Н. Н., Мушников А. Н.	
<b>ПРОЧНОСТЬ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ БРИКЕТОВ</b>	190
Полянский Л. И., Бабайлов Н. А., Логинов Ю. Н.	
<b>ОПТИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ БРИКЕТОВ ИЗ ОКСИДА МАГНИЯ</b>	191
Бабайлов Н. А., Полянский Л. И., Логинов Ю. Н.	
<b>ОСОБЕННОСТИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРМОНАГУЖЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ДЕФОРМАЦИЙ</b>	192
Маслов С. В.	
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ КЕРАМИК И КОМПОЗИТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ</b>	193
Гареев А. Р., Юрина А. Д., Уваров С. В., Наймарк О. Б.	
<b>ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ</b>	194
Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.	
<b>ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СДВИГОВЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ</b>	195
Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.	
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ КОМПЛЕКС НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ</b>	196
Москвичев В. В., Чернякова Н. А.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b>	197
Маликов А. Г., Завьялов А. П., Купер К. Э., Витошкин И. Е., Бегляров Е., Миронова М. И., Карпов Е. В.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ 45</b>	198
Лапин М. В., Кузнецов А. М., Мушников А. Н.	

<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ</b>	199
Мушников А. Н., Поволоцкая А. М.	
<b>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРЕ</b>	200
Балданов А. Б.	
<b>ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА МИКРОКАНАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА</b>	201
Байметова Е. С.	
<b>ВЛИЯНИЕ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ НА ТЕЧЕНИЯ МИКРОСТРУЙ</b>	202
Королева М. Р., Митрюкова Е. А.	
<b>ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ МАЛОЦИКЛОВОГО УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОПЫТНОГО СПЛАВА ТИТАНА</b>	203
Каманцев И. С., Кузнецов А. В., Корелин А. В., Корелин И. А.	
<b>ВНЕШНЯЯ АЭРОДИНАМИКА МНОГОСЕКЦИОННОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА</b>	204
Мищенкова О. В., Шигапова А. Р., Чернова А. А.	
<b>ОСТЕОИНТЕГРАЦИЯ КАК БИОПОДОБНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ КОСТНОИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТРАВМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ</b>	205
Кузнецов В. П.	
<b>ИНТРАОПЕРАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ВОЗВРАТНОГО ГОРТАННОГО ВО ВРЕМЯ ТИРЕОИДЭКТОМИИ</b>	206
Миронов В. А., Гагиев В. В., Белов С. С., Привалова В. В., Цаплина П. К., Гилева В. А., Жаксыбаева Э. Б.	
<b>ДООПЕРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА РАКА ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА</b>	207
Миронов В. А., Акимова А. В., Гагиев В. В., Белов С. С., Привалова В. В., Цаплина П. К., Гилева В. А., Жаксыбаева Э. Б.	
<b>ГРАДИЕНТНЫЙ КОМПОЗИТ Ti/TiN</b>	208
Бурхинова Н. Ю., Филиппов А. А.	
<b>СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ</b>	209
Кочанов А. Н.	
<b>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СТРУКТУР, ОСНОВАННЫХ НА ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ</b>	210
Варыгина М. П.	
<b>ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ РАЗРУШЕНИЮ</b>	211
Соколовская Э. А., Кудря А. В., Сергеев М. И., Алексеев В. И., Буданова Е. С.	

<b>ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МАГНИТОСТРИКЦИИ ДЛЯ СТЗ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТЕРМООБРАБОТКИ</b>	212
Проботюк В. В., Зверьков Н. Д., Кулак С. М.	
<b>ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФОРМУЛИРОВКИ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТИ</b>	213
Остапович К. В., Трусов П. В.	
<b>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ УПРУГО-ХРУПКИХ ТЕЛ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УЧЕТЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ЗНАЧЕНИЙ ПРОЧНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b>	214
Феклистова Е. В., Вильдеман В. Э., Мугатаров А. И.	
<b>МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРИКЦИОННОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ</b>	215
Атамашкин А. С., Приймак Е. Ю., Сёмка Я. С., Трушов В. А.	
<b>ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РЕАЛИЗАЦИЮ СТАДИИ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА В ОПЫТАХ НА СДВИГ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ</b>	216
Вильдеман В. Э., Мугатаров А. И., Староверов О. А., Струнгарь Е. М., Чеботарева Е. А.	
<b>ОСЛАБЛЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ПРЕГРАДАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК6, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМИ СПЛАВЛЕНИЕМ</b>	217
Кленов А. И., Бродова И. Г., Петрова А. Н., Смирнов Е. Б., Гармашев А. Ю.	
<b>МЕХАНИКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА</b>	218
Юсупов Д. Т.	
<b>THE MECHANICS OF DAMAGES AND THE DESTRUCTIONS.FEATURES OF DEFORMATION OF METAL-PIPE COLLAPSE UNDER THE SHOCK WAVE GENERATED BY THE UNDERWATER EXPLOSION</b>	
Yusupov D. T.	
<b>ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПЛАСТИН (-201) БЕТА-ОКСИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ПОДЛОЖЕК</b>	219
Шарков М. Д., Бойко М. Е., Бутенко П. Н., Бойко А. М., Поздняков А. Е., Чикиряка А. В., Алмаев А. В., Николаев В. И.	
<b>О РАЗЛИЧНЫХ УПРОЩЕННЫХ МОДЕЛЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И ИХ ВЛИЯНИИ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ</b>	220
Наседкин А. В.	
<b>КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ НАНОРАЗМЕРНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ</b>	221
Долгополова Л. Ю., Наседкин А. В., Наседкина А. А.	
<b>СИНХРОННЫЙ РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ СРОКАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ И ДИАГНОСТИКА ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ ТЕМПОВ НАГРЕВА</b>	222
Дегтярь В. Г., Гусев В. В., Калашников С. Т., Костин Г. Ф., Новиков А. И., Хлыбов В. И.	

<b>ОТДАЛЁННЫЕ ИСХОДЫ ИНТЕРВЕНЦИОННЫХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ У БОЛЬНЫХ СТАБИЛЬНОЙ СТЕНОКАРДИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКИХ ГРАДАЦИЙ</b>	223
Миронов В. А., Николаенко О. В., Куватов В. А., Куватова Е. В., Привалова В. В., Цаплина П. К.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКОВОК ИЗ СПЛАВА АМГ6</b>	224
Бурибаев Э.И.	
<b>К ВЫБОРУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ (CU-FE) ИЗ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ ОТ РАЗМЕРА ЗЕРЕН ПРИ ДИСПЕРСИОННОМ УПРОЧНЕНИИ-РАЗУПРОЧНЕНИИ</b>	225
Решетняк А. А., Шамшутдинова В. В.	
<b>КОНТРОЛЬ ЧИСТОТЫ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ</b>	226
Халилов Р. И., Колесниченко И. В.	
<b>ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОТЖИГА ХОЛОДНОКАТАННЫХ РУЛОНОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СЕРИИ 2XXX НА ПОЛУЧАЕМЫЙ РАЗМЕР ЗЕРНА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА</b>	227
Исякаев К. Т.	

# МАКРОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АВИАЦИОННОГО СПЛАВА АМг5, МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОРОШКОМ ВОЛЬФРАМАТА ЦИРКОНИЯ $ZrW_2O_8$ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ

Судариков А. В.<sup>1</sup>, Чумаевский А. В.<sup>2</sup>, Колубаев Е. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИ ТПУ, 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Россия, [sудариков-97@mail.ru](mailto:sудариков-97@mail.ru), [eak@ispms.ru](mailto:eak@ispms.ru)

<sup>2</sup>ИФПМ СО РАН, 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Россия, [tch7av@gmail.com](mailto:tch7av@gmail.com)

Обработка трением с перемешиванием (FSP) является относительно новым методом, позволяющим улучшать механические, микроструктурные и трибологические свойства металлов и сплавов благодаря термомеханической модификации поверхности. Метод FSP появился как новый вариант сварки трением с перемешиванием (FSW), представленный Институтом сварки (TWI) Великобритании в 1991 году для улучшения свойств поверхности на локальных участках [1].

Предыдущие исследования в области фрикционного перемешивания металлов и сплавов [2,3,4] показали, что модифицирование и варьирование технологических параметров таких, как скорость вращения, скорость перемещения и сила прижима инструмент значительно влияют на эволюцию микроструктуры и механические свойства.

В качестве модифицирующего компонента был выбран мелкодисперсный порошок вольфрамата циркония  $ZrW_2O_8$ , обладающий отрицательным коэффициентом теплового расширения [5].

Фрикционная перемешивающая обработка образцов из алюминиевого сплава АМг5 с равномерно распределенными дорожками в виде отверстий с уплотненным порошком  $ZrW_2O_8$  проводилась на лабораторной установке в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН. Толщина использованного листового проката составляла 5 мм, глубина обработки 3 мм. Подбор параметров процесса осуществлялся эмпирически. Обработка поверхности материала осуществлялась до четырех последовательных проходов инструментом.

На рис. 1А показана макроструктура шлифа АМг5 после первого прохода инструмента, а на рис. 1Б после четвертого. В структуре зоны обработки выделяется зона перемешивания (SZ), зона термомеханического влияния (ТМАЗ), различно организованную с отступающей (RS) и наступающей (AS) стороны.

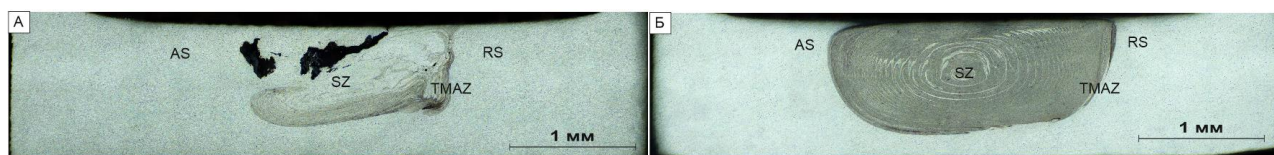


Рис.1. Макроструктура зоны обработки сплава АМг5 с  $ZrW_2O_8$  после 1-го и 4-ого проходов инструментом: А – после 1-ого; Б – после 4-ого

С увеличением количества проходов инструмента зона перемешивания материала становится более выраженной и приобретает свойственную ей кольцевидную форму. Порошкообразные агломераты частиц вольфрамата циркония  $ZrW_2O_8$  от прохода к проходу распределяются равномерно по всему объему зоны перемешивания. На границах перехода зон происходит уменьшение размера зерна от зоны термомеханического влияния (ТМАЗ) к зоне перемешивания (SZ). При этом видимых дефектов металла после четырехпроходной обработки не наблюдается.

## Литература

1. В.М. Томас, Э.Д. Николас, Дж.К. Нидэм, и др. Заявка на патент № 9125978.8 (декабрь 1991 г.)
2. С.Мабува, В. Мсоми. *Материалы сегодня*. 2020, Т. 26, Вып. 2, 193-199
3. А.В. Чумаевский, А.П. Зыкова, А.В. Судариков и др. *Materials*. 2023, Т. 16, Вып. 2, 817-844
4. В.Е. Рубцов, А.В. Чумаевский, Е.О. Княжев и др. *Metals*. 2024, Т. 14, Вып. 1, 105-116
5. Л.Х.Н. Риммер, К. Рефсон, М.Т. Дав. *Физическая химия Химическая физика*. 2023, Т. 25, Вып. 25, 16753-16762

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

Мокрицкий Б. Я., Непогожев А. А.

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»  
27, улица Ленина, город Комсомольск-на-Амуре, 681013, [boris@knastu.ru](mailto:boris@knastu.ru)

На предприятиях АО «КОНЦЕРН ВКО «АЛМАЗ-АНТЕЙ» методом бесцентрового шлифования изготавливаются детали машин, выполненные из никелевого сплава ХН60ВТ, из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, из высоколегированной стали 12Х2НВ ФА и из конструкционной стали 30ХГСА. Диаметр детали Валик равен 3,0<sup>-0,06</sup> мм, диаметр детали Шпилька равен 3,48<sup>-0,03</sup> мм, диаметр детали Палец равен 6,055<sup>-0,025</sup> мм, диаметр детали Штырь равен 10,94<sup>-0,03</sup> мм. Требования по шероховатости жёсткие, у детали Палец шероховатость по Ra 1,25, у остальных деталей Ra 3,2. Прижог материала деталей недопустим.

Крупносерийное изготовление указанных деталей вынуждает настроить высокоскоростное шлифование. Шлифование одной детали длится от 3 до 5 секунд. Осуществляется контроль размера диаметра деталей, шероховатость шлифованной поверхности. Контроль наличия или отсутствия прижога осуществляется выборочно. Контроль осуществляет отдел технического контроля. Контроль прижога по существу возложен на оператора станка. Ошибка оператора на 10 минут приводит к браку 120 деталей, что недопустимо.

Изменяемыми параметрами шлифования являются глубина резания и число оборотов ведущего круга. Число оборотов абразивного инструмента постоянно и равно 1900 в минуту.

В указанных условиях чрезвычайно важно исключить прижог, т.е. недопустима высокая температура в зоне шлифования. Поскольку материалы деталей разные, то и температура, при которой может образоваться прижог, тоже разная. По сути, вопрос сводится к разработке рекомендаций по выбору абразивного инструмента, шлифование которым не приведёт к образованию прижога. Число марок абразивных инструментов, пригодных для бесцентрового шлифования, ограничено.

В результате исследования выявлено:

а) Среди исследованных абразивных инструментов с характеристиками 25А F60 O6V, 25А F60 Q6V, 25А F80 O6V и 25А F80 N7V каждый из инструментов имеет свою область применения.

б) Нет универсального инструмента, который был бы рационален для всей гаммы рассмотренных марок обрабатываемых материалов.

в) Шлифование абразивным инструментом с характеристиками 25А F60 O6V не только обеспечивает (сохраняет) максимальную исходную микротвёрдость материала детали, но обеспечивает минимум её изменения при росте глубины шлифования (т.е. температуры резания). Применение абразивного инструмента с характеристиками 25А F80 O6V снижает микротвёрдость материала детали в результате её шлифования, при этом перепад (с 600 единиц микротвёрдости до 585 единиц) микротвёрдости значителен при изменении глубины шлифования.

Установлено, что изменение глубины резания в 7 раз (с 0,05 мм до 0,35 мм) привело к снижению микротвёрдости в 1,35 раза, что очень существенно.

г) Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод: в качестве критерия выбора абразивного инструмента необходимо использовать параметр «минимальная температура в зоне резания». Это исключает прижог материалов деталей.

# СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В БИНАРНОМ ЭКВИАТОМНОМ СПЛАВЕ Ni<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub> ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ СТАРЕНИИ

Белослудцева Е. С.<sup>1,2</sup>, Винокуров Д. Е.<sup>1,2</sup>, Царигородцева А. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, 18, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620137, РФ, [ebelosludceva@mail.ru](mailto:ebelosludceva@mail.ru)

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет, 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, РФ

В работе подробно исследована морфология мартенсита в сплаве Ni<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub> на разных масштабных уровнях. Анализ изображений микроструктуры и микроэлектроннограмм показал, что иерархия одноплатных структур соответствует нескольким размерным уровням: от сотен микрометров до величин в нескольких нанометров, соответствующих межплоскостным расстояниям. Мартенсит имеет преимущественную морфологию в виде иерархии пакетов тонких (отношение длины к толщине ~10:1) пластинчатых и внутренне двойникованных кристаллов с плоскими границами габитусов  $\{111\}_{L10} // \{101\}_{B2}$ . Системы двойникового сдвига L1<sub>0</sub>-мартенсита  $\{111\} \langle 11\bar{2} \rangle_{\text{ГЦТ}}$  (или  $\{101\} \langle 1\bar{1}0 \rangle_{\text{ОЦТ}}$ ) близки к мягкой моде Зинеровского типа  $\{101\} \langle 10\bar{1} \rangle_{B2}$ , типичной для ОЦК-кристаллов [1, 2]. Такая хорошо организованная структура сплавов формируется за счет самосогласованного роста мартенситных кристаллов (определяемого наиболее выгодным направлением мартенситных сдвигов), т.е. так, чтобы суммарная макроскопическая деформация и упругие напряжения были минимальными. Это в свою очередь определяет формирование самоаккомодирующей пакетной иерархии субструктуры кристаллов мартенсита всех кристаллографически эквивалентных ориентаций с первичным микродвойникованием, вторичным нанодвойникованием и образованием дефектов упаковки.

В результате естественного старения (порядка 20 лет) впервые обнаружено [3], что произошло фазовое расслоение сплава Ni<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub> в результате перераспределения никеля и марганца. Образовавшиеся выделения характеризуются округлыми границами и разноточностью (от 1 до 10 мкм). Объемная доля таких выделений ~ 20%. Установлено, что в этих областях содержание никеля больше на 2...3 ат. % от стехиометрического состава. Соответственно, в матрице образца наблюдается повышенное содержание марганца по сравнению с химическим составом, наблюдаемым до распада. При этом остальная часть сохраняет мартенситную структуру, что также подтверждается результатами рентгеноструктурного фазового анализа.

Методом EBSD-анализа установлено, что образовавшиеся области представляют смесь двух фаз – раздвойникованная фаза NiMn (L1<sub>0</sub>) и Ni<sub>3</sub>Mn (кубическая решетка). При этом объемная доля кубической фазы составляет 30% от размера области или 2% от всей поверхности исследования.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (Шифр «Структура» Г.р. № 122021000033-2) Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН.*

## Литература

1. Хачин, В.Н. Никелид титана: структура и свойства / В.Н. Хачин, В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев. – М.: Наука, 1992. – 160 с.
2. Белослудцева Е.С. микроструктура, термоупругие мартенситные превращения и свойства B2 сплавов на основе Ni-Mn: дис. ... канд. физ. мат. наук: 01.04.07/ Е.С. Белослудцева- ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, 2017 - 167 с.
3. Е.С. Белослудцева, В.Г.Пушин, Н.Н. Куранова, Д.Е. Винокуров, А.О. Гусев. Сборник статей XXII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов — молодых ученых. 2023, 311 – 315.

# РАНЖИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА СЪЕМНЫХ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Грачев Д. И.<sup>1</sup>, Панин С. В.<sup>2\*</sup>, Степанов Д. Ю.<sup>2</sup>, Козулин А. А.<sup>3</sup>, Арутюнов С. Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный медико-стоматологический университет  
им. А.И. Евдокимова, 20/1, ул. Делегатская, г. Москва, 127473, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, 2/4, просп. Академический, г. Томск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, 36, просп. Ленина, г. Томск, Российская Федерация

Несмотря на широкое внедрение имплантационных технологий в стоматологическом ортопедическом лечении больных с полной потерей зубов, использование полных съемных зубных протезов (ПСЗП) остается широко распространенным и доступным методом лечения. Полная потеря зубов связана как с возрастными изменениями пациентов, так и осложнениями кариеса, и заболеваниями пародонта [1]. Протезирование пациентов этой категории сложная врачебная процедура, нередко с неэффективным исходом [2].

Развитие аддитивных технологий открыло широкие перспективы оперативного и экономически доступного планирования и последующего лечения пациентов с полной потерей зубов. Наиболее распространенным материалом, используемым, в том числе, для 3D-печати как базисов, так и зубных рядов, является полиметилметакрилат (ПММА). Однако, помимо технологических аспектов изготовления ПСЗП, актуальность представляет оценка их эффективности как (стоматологической) конструкции с позиции деформационного поведения в условиях приложения контактных нагрузок. В этой постановке важная роль отводится методам численного моделирования деформационных процессов, в том числе при циклическом нагружении. В то же время, как для верификации моделей, так и для проектирования конструкций актуально использование натуральных экспериментов.

Помимо самого факта экспериментальной верификации КЭ-модели, в процессе натуральных испытаний регистрируется значительный объем результатов, требующих проведения должной обработки, анализа и систематизации. Для решения этой проблемы вначале необходимо выделить информативные характеристики деформационно-прочностных свойств ПСЗП, на основе которых можно провести их ранжирование по степени важности. Далее, с учетом множества выделенных признаков, необходимо решать задачу многокритериальной оптимизации.

В современном мире цифровой трансформации аналоговых технологий важно для врача-стоматолога иметь возможность обоснованного выбора конструкции протеза с учетом индивидуальных морфологических особенностей беззубых челюстей, конструкционного материала, из которого целесообразно изготовить ПСЗП, и, что особо актуально, выбрать адекватной этим условиям технологию их производства. Правильное сочетание этих переменных является залогом эффективного стоматологического протетического лечения пациентов с полной потерей зубов.

Целью работы являлось развитие методики ранжирования цифровых методов изготовления съемных полных зубных протезов по данным их натуральных механических испытаний. Для этого проведено исследование деформационного отклика конструкций ПСЗП, изготовленных посредством современных стоматологических цифровых субтрактивных и аддитивных технологий. Для этого нагружение проводили на разные блоки зубного ряда.

Благодарности. Исследование выполнено по проекту госзадания ИФПМ СО РАН FWRW-2021-0010.

## Литература

1. *GBD 2016 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators Global, Regional, and National Incidence, Prevalence, and Years Lived with Disability for 328 Diseases and Injuries for 195 Countries, 1990-2016: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. Lancet, 2017, 390, 1211–1259.*
2. *Dawid, M.-T.; Moldovan, O.; Rudolph, H.; Kuhn, K.; Luthardt, R.G. Technical Complications of Removable Partial Dentures in the Moderately Reduced Dentition: A Systematic Review. Dentistry journal 2023, 11, 55.*



# DEFORMATION AND FRACTURE OF DENDRITIC STRUCTURES FORMED DURING WIRE-FEED ELECTRON-BEAM ADDITIVE MANUFACTURING OF AL-SI ALLOY

Balokhonov R. R., Utyaganova V. R., Gatiyatullina D., Romanova V. A.

*Institute of Strength Physics and Materials Science, SB, RAS, rusy@ispms.ru*

Using the methods of optical and electron microscopy, we have experimentally studied the microstructure of an Al-Si12 eutectic alloy fabricated by the additive layer-by-layer electron-beam wire melting. The results demonstrated that inside every layer the aluminum dendrites measuring tens of microns are formed, which are surrounded by a eutectic network. The eutectic network is identified by transmission microscopy as an aluminum matrix with volumetric homogeneously distributed primary-silicon submicron-sized particles. It was found out that in-between the layers in the heat affected zone an interlayer is formed from aluminum inherited from the dendrites. The interlayer contains agglomerated micro-sized silicon particles that are distributed inhomogeneously in the form of a cellular structure.

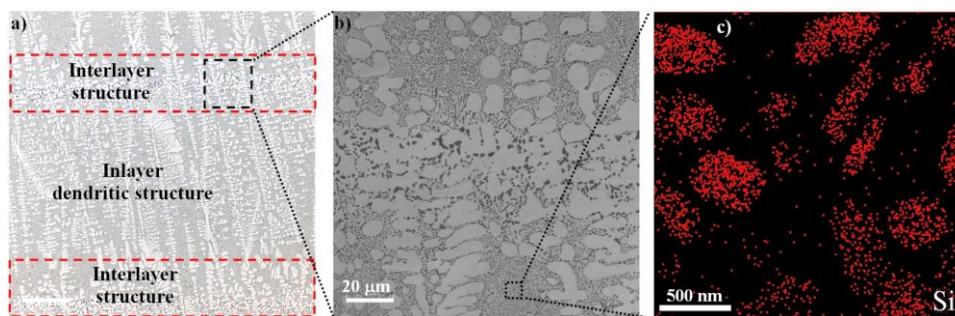


Fig. 1. Images of AlSi12 EBAM alloy at a scale of 100 (a) and 20  $\mu\text{m}$  (b) and 500 nm (c)

Based on the experimentally obtained images, a number of model structures were designed: dendritic structures with and without interlayer and a composite eutectic material structure. In order to describe the mechanical response of silicon and aluminum, we used the isotropic constitutive models of elasticity and elasticity-plasticity including fracture, respectively. The structures and the models were integrated into ABAQUS/Explicit. The calculations of the composite structure tension were performed. A two-level approach was implemented, involving a primarily solution of the problem of a deformed aluminum matrix – silicon particles composite at the micro level and, by averaging over the volume, the effective properties of the eutectic network were identified. These properties were then used at the level of hundreds of microns in order to study the deformation and fracture of the dendritic structures. The results of modeling demonstrate that in the interlayer in the region of its interface with the eutectic network a high stress concentration is formed, which results in a plastic flow localization, an early crack nucleation, and a decreased strength of the dendritic structure.

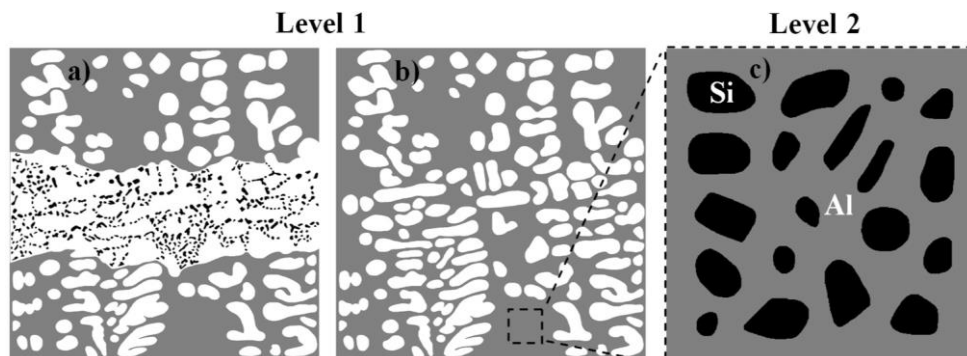


Fig. 2. Model structures in the heat-affected zone (a), inside the layer (b) and in the eutectic network (c)

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 23-11-00222, <https://rscf.ru/en/project/23-11-00222/>).

# ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТИПОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОЛТЮБИНГОВЫХ ТРУБ

Порошин В. Б.<sup>1</sup>, Уфимцев А. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет), дом 85, просп. им. В.И. Ленина,  
г. Челябинск, 454080, Россия, [poroshin2816@mail.ru](mailto:poroshin2816@mail.ru)

Термин колтюбинг (*coiled tubing*) относится как к одной из прогрессивных технологий современного нефтегазового промысла, так и к ее основному объекту – длинной гибкой трубе, намотанной на барабан, и опускаемой в скважину на глубину до 1,5...2 км и более.

В процессе эксплуатации трубная плеть испытывает интенсивное воздействие повторно-переменного циклического изгиба, внутреннего давления и растяжения весом трубы. Это обстоятельство определяет весьма ограниченный ресурс объекта (80–300 типовых спуско-подъемных операций – в зависимости от марки стали, сочетания нагрузок и их интенсивности). Те же факторы влияют и на характер деформирования в отдельных областях трубы – знакопеременное пластическое течение или накопление деформации на фоне повторно-переменного неупругого деформирования. Обусловленное этими процессами образование трещин малоциклового усталости грозит обрывом трубной плети, что неизбежно повлечет многомиллионные потери, определяемые как стоимостью самой трубы, так и выводом из эксплуатации заглушенной скважины.

Одним из путей предотвращения подобных негативных последствий являются эквивалентные ресурсные испытания или испытания на подтверждение ресурса, проводимые с применением специальных стендов на образцах, вырезанных из трубной плети – вновь изготовленной или с наработкой. Такие стенды уникальны и существуют лишь в отдельных организациях, например, в Клаустальском техническом университете (Германия), университете города Талса (США), Тюменском государственном нефтегазовом университете, предприятии ОАО «Уралтрубмаш» (г. Челябинск). Вместе с тем надо признать, что такие испытания трудоемки, продолжительны и дороги. Существенно сократить их объем за счет выбора представительных программ нагружения – воспроизводящих предельные состояния, наблюдаемые в условиях эксплуатации – позволили бы адекватные цифровые модели стенда и образца.

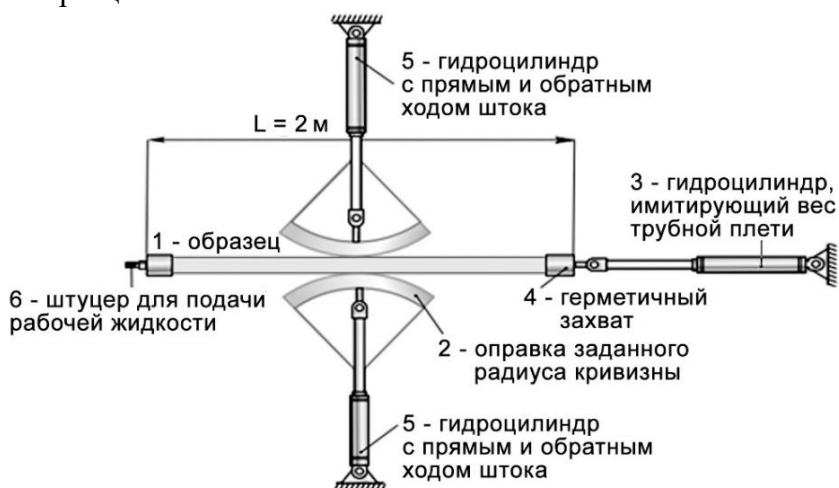


Схема стенда для проведения эквивалентных испытаний

Средствами пакета МКЭ ANSYS Mechanical были сформированы модели испытательного стенда (см. рисунок) и образца трубы. С их помощью выполнен поцикловый анализ кинетики повторно-переменного неупругого деформирования образца из стали А606–4 (США) при ряде сочетаний эксплуатационных нагрузок. Выявленные вариантами расчетами закономерности неупругого деформирования

позволили очертить границы областей так называемой карты состояния, определяющей поле параметров нагрузки, при которых реализуется тот или иной тип неупругого деформирования и соответствующее предельное состояние объекта.

# КОСВЕННАЯ ДИАГНОСТИКА ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ФАКТОРОВ, ПРОЦЕССОВ И ОТКАЗОВ

Мазур Е. В.<sup>1</sup>, Великанов Н. Л.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Калининградский Государственный Технический Университет,  
д.1, Советский проспект, г. Калининград, 236022, Россия*

<sup>1</sup>*ekaterina.mazur@gmail.com*

<sup>2</sup>*nikolaj.velikanov@klgtu.ru*

Диагностика судовых дизельных установок является широко изучаемой областью науки. Множество исследований надежности в судоходстве проведено и находится в разработке на сегодняшний день. Причина такого интереса имеет в первую очередь экономический аспект. Так, по прогнозу ЮНЕТАД на 2024 год, объем морских перевозок в мире увеличится на 2,1% относительно 2023 года, и динамика роста в дальнейшем ожидаема [1].

Одним из самых «чувствительных» к износу элементов судового двигателя является цилиндропоршневая группа (ЦПГ), осмотр, с целью контроля состояния которого, может спровоцировать попадание загрязняющих частиц или ошибку в сборке механизма. Методы диагностики без прямого воздействия на агрегат становятся все более привлекательными в мире развития технологий и совершенствования исследовательских методов.

Предлагаемая методика косвенной диагностики ЦПГ судового дизельного двигателя имеет в своем основании математический алгоритм, учитывающий связанность двух и более неисправностей с последующем прогнозом состояния ЦПГ [2]. Большой объем количественных данных о состоянии системы можно получить при помощи сбора информации с различных датчиков, которые с ростом автоматизации в судоходстве, являются инструментом контроля всех необходимых рабочих параметров пропульсивной установки. Основываясь с одной стороны на логических взаимосвязях физико-химических процессов, протекающих в судовой энергетической установке, с изменениями показателей надежности системы, а с другой стороны на данных поступающих с ряда контрольных датчиков, возможно сформировать ориентированный граф возникновения отказов. В основании данного графа размещаются факторы (отклонения в физико-химических процессах), далее устанавливаются связи с условиями и причинами дефектов, и далее формируются связи с аварийными ситуациями, и с откликами в системе датчиков контроля состояния.

Обладая базой данных по показателям параметров с датчиков судовой энергетической установки, на основе ориентированного графа и матричного анализа сформирован алгоритм математической обработки данных и создан метод оценки технического состояния элементов ЦПГ судового дизельного двигателя. Ключевыми особенностями данного метода является разделение собранной информации на два блока: первый – общая область, структурно связанная с целевой областью (параметры находятся в рабочей зоне) и второй блок – это область выбросов (срабатывание сигналов тревоги) [3,4]. Этим путем и снижается сложность математической обработки при анализе ориентированного графа и повышается точность метода.

## *Литература*

1. *Обзор морского транспорта 2023 год. Общий обзор [Электронный ресурс] // Организация Объединенных Наций, Женева, 2023 год. URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023overview\\_ru.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023overview_ru.pdf) (дата обращения: 10.03.2024).*
2. *Tan Y. et al. Multi-label classification for simultaneous fault diagnosis of marine machinery: a comparative study // Ocean Engineering. – 2021. – Т. 239. – С. 109723.*
3. *Jiao J., Zhao M., Lin J. Multi-weight domain adversarial network for partial-set transfer diagnosis // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2021. – Т. 69. – №. 4. – С. 4275-4284.*
4. *Айрапетов А. Э., Коваленко А. А. Виды генеративно-состязательных сетей // Достижения науки и образования. – 2019. – №. 4 (45). – С. 7-13.*

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА РЕШЕТЧАТЫХ СКАФФОЛДОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ

Пирогова Ю. В.<sup>1</sup>, Ташкинов М. А.<sup>1</sup>, Виндокуров И. В.<sup>1</sup>, Еленская Н. В.<sup>1</sup>, Шалимов А. С.<sup>1</sup>,  
Тарасова А. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29,  
Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Российская Федерация, [yu.pirogova@pstu.ru](mailto:yu.pirogova@pstu.ru)*

Тканевая инженерия костных тканей направлена на восстановление функций поврежденных костей с использованием имплантируемых искусственных пористых скаффолдов, которые обеспечивают поддержку для регенерации ткани, включая прикрепление клеток, их пролиферацию и дифференцировку. С помощью аддитивных технологий можно создавать индивидуальные скаффолды, обладающие не только биосовместимостью, но и имеющие схожее с восстанавливаемой костью механическое поведение при сжимающих нагрузках. В работе рассмотрена трехмерная модель микроструктуры трабекулярной кости. В качестве прототипов для скаффолдов исследуются как периодические, так и стохастические структуры, созданные с помощью различных подходов.

Все исследуемые модели произведены с помощью трехмерной печати из полилактида (PLA), биосовместимого термопластичного полимера. Проведены механические испытания для оценки деформационного поведения и свойств образцов при сжимающей нагрузке, в частности, с использованием метода цифровой корреляции изображений. Выполнены экспериментальные и численные исследования для определения особенностей деформационного поведения и упругих свойств локальных составных элементов неоднородной структуры биомиметических материалов.

Выполнен морфометрический анализ для определения степени соответствия морфологии структуры скаффолдов и заменяемой костной ткани. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании скаффолдов с заданными требованиями к механическому отклику и пределу прочности.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2023-0003).

# НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОТСЛОЕНИЯ КРУГОВОЙ ПЛАСТИНЫ ОТ ПОДЛОЖКИ

Гандилян Д. В.<sup>1</sup>, Устинов К. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, д. 101, корп. 1,  
пр-т Вернадского, г. Москва, 119526, Россия  
david.ghandilyan@mail.ru  
ustinov@ipmnet.ru

В области микро- и наноэлектроники широко используются технологии нанесения упрочняющих и износостойких покрытий на поверхности элементов конструкций (система покрытие-подложка). Возникает необходимость в исследовании механических деформаций и напряжений данных покрытий, в частности покрытий, которые представляются в виде круговых пластин (мембран). Особенно необходимо корректно исследовать случаи тонких пластин, изгиб которых сильно зависит от напряжений в срединной поверхности, причем эта зависимость существенно нелинейная. Также при исследовании деформирования покрытия в качестве граничных условий обычно используют условие жесткой заделки, где не учитываются свойства подложки, с которой рассматриваемое тонкостенное покрытие сопрягается, оправдывая это её «массивностью». Однако оно выполняется лишь приближенно. Поэтому для более точного решения используются граничные условия типа обобщенной упругой заделки, т.е. пропорциональности продольного, нормального смещения и угла поворота в точке заделки действующим в этой точке продольной и поперечной силам и изгибающему моменту [1-5].

Рассмотрена задача о деформировании круговой пластины под действием равномерной постоянной поперечной нагрузки, сопряженной с подложкой, где условие сопряжения моделируется с помощью граничных условий типа обобщенной упругой заделки. Целью работы является исследования влияния упругой заделки на деформирование круговой пластины. Решение задачи получено с помощью следующих моделей: модель пластины без учета растягивающих усилий (модель Софи Жермена), мембранная модель, модель Фепля фон Кармана в предположении постоянства продольных усилий. Численные результаты получены для пластины из алюминия на кремниевом основании (Рис. 1).

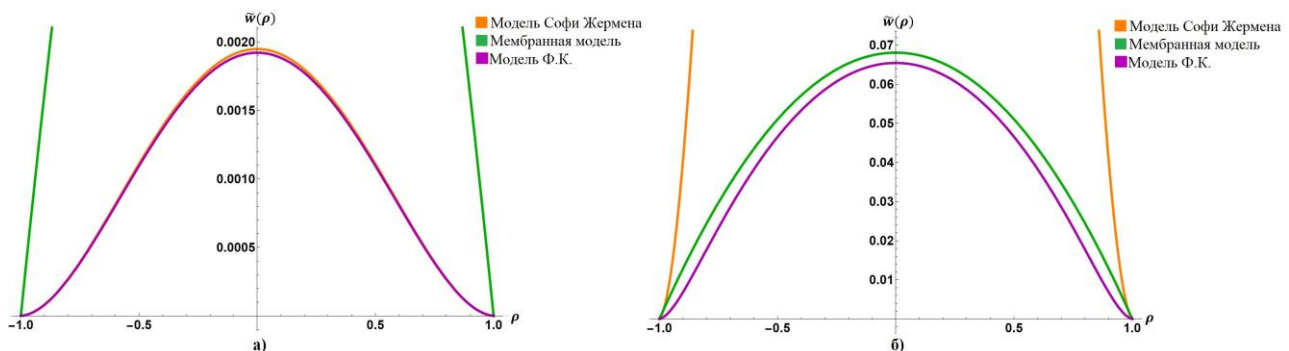


Рис. 1. Обезразмеренная нормальная компонента смещения при разных значениях интенсивности поперечной нагрузки  
(а) — интенсивность составляет  $p = 10^{-8}$ , (б) — интенсивность составляет  $p = 5 \cdot 10^{-6}$ .

## Литература

1. Cotterell B., Chen Z. Buckling and cracking of thin film on compliant substrates under compression // *Int. J. Fracture*. 2000. V. 104. № 2. P. 169–179.
2. Yu H.-H., Hutchinson J.W. Influence of substrate compliance on buckling delamination of thin films // *Int. J. Fract.* 2002. V. 113. P. 39–55.
3. S. Li, Wang J., Thouless M., 2004. The effects of shear on delamination in layered materials. *J. Mech. Phys. Solid.* 52 (1), 193–214.
4. Andrews M., Massabo, R., Cox, B., 2006. Elastic interaction of multiple delaminations in plates subject to cylindrical bending. *Int. J. Solid Struct.* 43 (5), 855–886
5. Ustinov K.B., 2015. On separation of a layer from the half-plane: elastic fixation conditions for a plate equivalent to the layer. *Mech. Solids* 50 (1), 62–80.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ПОДВИЖНЫМИ СТЕНКАМИ

Квашнин А. Е., Потянихин Д. А.

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 27, пр. Ленина,  
Комсомольск-на-Амуре, 681013, Российская Федерация, kvashnin\_ae@mail.ru*

Рассматривается математическая модель процесса получения непрерывнолитой полосы из алюминиевого сплава АД0 на литейно-ковочном модуле усовершенствованной конструкции [1], схема которого представлена на рис. 1. Расплав металла попадает из ковша 1 через погружной стакан 2 в охлаждаемый кристаллизатор, состоящий из подвижных боковых бойков 3, приводимых в движение эксцентриковыми валами 4 и 5, и подвижных вертикальных плит 6, совершающих вертикальные перемещения. Боковые бойки имеют разную форму: один из них прямой, другой имеет наклонный участок. Особенностью представленной схемы работы устройства [1] является то, что эксцентрики 4 и 5 повернуты друг относительно друга на  $180^\circ$ , что приводит к увеличению сдвиговых деформаций, возникающих от скольжения затвердевшего металла по шероховатой поверхности прямого бойка.

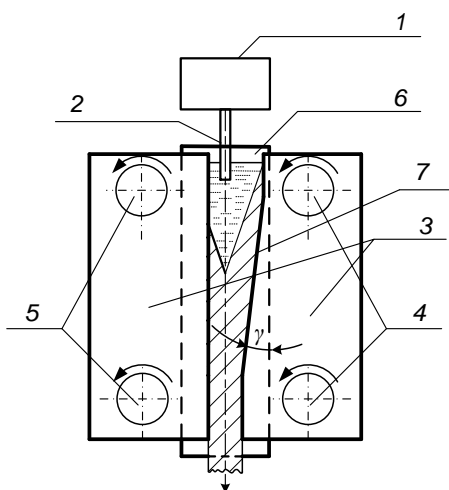


Рис. 1. Схема конструкции литейно-ковочного модуля

Для описания процесса деформирования закристаллизовавшегося металла используется модель термовязкопластического течения изотропно упрочняющегося тела, физико-механические свойства которого зависят от температуры. Поведение расплава описывается в рамках модели вязкой ньютоновской жидкости. Фазовое состояние определяется температурой. На поверхностях контакта металла с оснасткой происходит теплообмен, учитывается контактное трение.

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния используется разностный численный метод, использующий разбиение расчетной области трехмерной сеткой ортогональных элементов [2]. Для каждого элемента записывается разностное представление системы модельных соотношений, с учетом начальных и граничных условий. Механические

характеристики материала аппроксимированы аналитической зависимостью по имеющимся экспериментальным данным [3]. Указанный численный метод реализован в виде программы для ЭВМ, использующей алгоритм с пошаговым нагружением, где шаг ассоциируется с приращением угла поворота эксцентрикового вала. На каждом шаге определяется граница жидкого и затвердевшего металла.

Результатом решения являются поля температуры и параметров напряженно-деформированного состояния в пространственной области для дискретных моментов времени, соответствующих шагам численного счета. Показана эффективность процесса деформации по усовершенствованному способу на новой конструкции литейно-ковочного модуля.

## Литература

1. В.И. Одинокоев, А.И. Евстигнеев, Э.А. Дмитриев, Д.А. Потянихин, А.Е. Квашнин. Патент № 2781932 С1 Российская Федерация, МПК В22D 11/041. Устройство для получения непрерывно-литых деформированных заготовок : № 2022107665 : заявл. 22.03.2022 : опублик. 21.10.2022; заявитель ФГБОУ ВО «КнАГУ».
2. В.И. Одинокоев, Э.А. Дмитриев, А.И. Евстигнеев, Д.А. Потянихин, А.Е. Квашнин. Математическое моделирование и численные методы, 2021, № 3(31), 3-23.
3. В.А. Кроха. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Справочник. Москва: Машиностроение, 1980, 160 с.

# ОДНО АВТОМОДЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ С ОСОБЕННОСТЬЮ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Казаков А. Л.<sup>а</sup>, Спевак Л. Ф.<sup>б</sup>

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*  
<sup>а</sup>*a\_\_kazakov@mail.ru*, <sup>б</sup>*lfs@imach.uran.ru*

Доклад посвящен построению и исследованию точных решений [1 – 3] нелинейного уравнения теплопроводности со степенной нелинейностью, которое в случае центральной симметрии может быть записано в виде

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

Здесь  $u(t, \rho)$  – искомая функция,  $t$  – время,  $\rho$  – радиальная координата в полярной системе,  $\sigma > 0$  – константа.

Поиск решения уравнения (1) в виде

$$u = \rho g(x), \quad (2)$$

где  $x = t/\rho$  – автомодельная переменная, приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению относительно функции  $g(x)$ :

$$x^2 \left( gg'' + \frac{(g')^2}{\sigma} \right) - x \left( 1 + \frac{2}{\sigma} \right) gg' - g' + \left( 1 + \frac{1}{\sigma} \right) g^2 = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) при допустимых начальных условиях позволит найти решение уравнения (1) вида (2). В данной работе рассматриваются следующие начальные условия:

$$g(x_0) = 0, \quad g'(x_0) = \frac{\sigma}{x_0^2}. \quad (4)$$

Здесь  $x_0 \neq 0$ . Первое из условий (4) приводит к появлению особенности в уравнении (3), вызванной тем, что обращается в нуль множитель перед старшей производной.

Поскольку проинтегрировать в квадратурах уравнение (3) в общем случае невозможно, для решения задачи (3), (4) был разработан численный итерационный алгоритм на основе метода коллокаций.

Построенные с достаточной точностью решения задачи (3), (4) позволяют найти решения уравнения (1) вида (2), которые обладают особенностью: при  $\rho \rightarrow 0$  они неограниченно возрастают. Последнее свойство позволяет использовать эти решения для верификации неограниченных приближенных решений уравнения (1), найденных другими методами.

Проведенные расчеты показали эффективность предложенного численного алгоритма решения задачи (3), (4), а также возможность применения полученных результатов для исследования неограниченных решений уравнения (1).

## *Литература*

1. А.Л. Казаков, С.С. Орлов. Труды Института математики и механики УрО РАН. 2016, Т. 22, № 1. 112–123.
2. А.Л. Казаков, Л.Ф. Спевак. Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. 2020, Т. 34, 18–34.
3. A.L. Kazakov, L.F. Spevak. Mathematics. 2022, V. 10, iss. 9.

# ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВИБРОНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДОРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИИ ТУРБИННОЙ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Пивоварова М. В.<sup>1</sup>, Нихамкин М. Ш.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия

Лопатки турбин – ответственные высоконагруженные детали газотурбинных двигателей, работающие в условиях вибраций. В процессе доводки двигателя часто возникает необходимость снижения вибронапряжений в лопатках. Это достигается, в частности, изменением геометрии лопатки с последующей проверкой при специальных дорогостоящих испытаниях натурального двигателя. В отдельных случаях с первой попытки не удается получить нужный результат, что приводит к временным и финансовым потерям. Цель настоящей работы состоит в снижении объема доводочных испытаний за счет приближенного расчетного прогнозирования снижения вибронапряжений в лопатке при изменении геометрии ее профильной части.

Приближенное расчетное прогнозирование изменения вибронапряжений напряжений в лопатке при изменении геометрии профильной части строится в рамках следующих допущений:

- изменение геометрии незначительно и носит локальный характер;
- изменение геометрии не приводит к значительному изменению собственных частот колебаний;
- аэродинамические силы, действующие на лопатку, и характеристики демпфирования остаются таким же, как и в исходной лопатке.

Суть расчетного прогнозирования изменения вибронапряжений состоит в том, что из условия равенства кинетической энергии вибронапряжения в доработанной лопатке масштабировались к исходной лопатке.

Коэффициент изменения максимальных (намеренных) вибронапряжений определяется с учетом масштабированных максимальных эквивалентных напряжений в исходной и доработанной лопатках.

Метод был апробирован и верифицирован на компрессорной лопатке в условиях испытаний натурального двигателя.

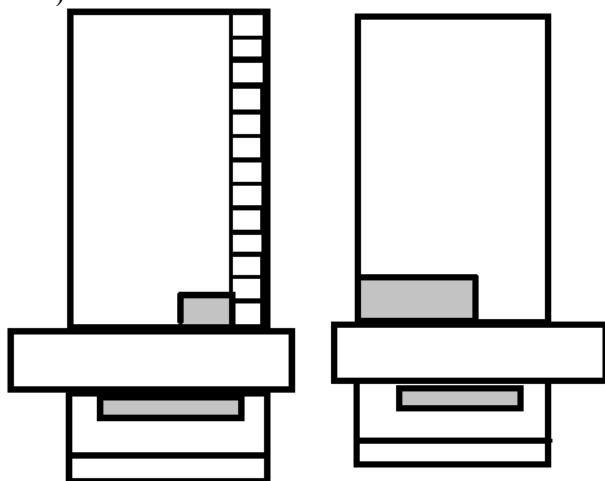
Реализация подхода расчетной оценки изменения динамических напряжений при изменении геометрии лопатки представлена на примере охлаждаемой турбинной лопатки с анизотропными свойствами [1].

При испытаниях турбинной лопатки высокого давления зафиксированы высокие динамические напряжения на резонансных режимах в диапазоне работы двигателя по первой изгибной, первой крутильной и второй изгибной формам колебаний. При этом по расчету зоны статических концентраторов напряжений (корневое сечение в спинке и в переходе с галтели с нижний отводной канал, на ножке под полкой со стороны спинки) и зоны концентраторов динамических напряжений по первой изгибной форме колебаний совпадают. Схема тензометрирования лопатки разрабатывалась с применением метода оптимального расположения тензорезисторов [2-4], что позволило с большой точностью зарегистрировать динамические напряжения на резонансных режимах.

На первом этапе оценки проводится расчетный модальный анализ исходной и доработанной геометрий лопатки в изолированной постановке, определяются собственные частоты и формы колебаний лопаток, распределение динамических напряжений при собственных формах колебаний с учетом задания характеристик монокристаллического сплава с ортотропными свойствами.



Доработка геометрии лопатки представлена на рисунке 1 (зоны утолщения показаны серым цветом).



Вид со стороны  
корыта

Вид со стороны  
спинки

Рис. 1. Доработка лопатки турбины

Оценка изменения динамических напряжений в доработанной геометрии турбинной лопатки показала значительное снижение напряжений по первой изгибной и первой крутильной формам колебаний. Также произошло смещение узловых линий по крутильной форме колебаний ближе к оси лопатки, концентраторы динамических напряжений перешли в другие зоны. По второй изгибной форме колебаний осуществлена частотная отстройка от резонансного режима с существенным запасом по частоте.

Эффективность данных мероприятий будет проверена на испытаниях в составе двигателя.

#### Литература

1. А.Е. Соловьев, С.А. Голынец, К.К. Хвацкий. Анизотропия характеристик упругости при растяжении монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов. Труды ВИАМ. 2017. №10 (58). С.112-118.
2. М.В. Пивоварова, В.А. Бессчетнов. Разработка расчетного метода определения оптимального размещения тензорезисторов и определение коэффициентов чувствительности форм колебаний. Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. №50. С. 5-14.
3. М.В. Пивоварова, В.А. Бессчетнов, А.В. Артемов, В.М. Лимонова. Верификация расчета распределения динамических напряжений и расчетного метода разработки схемы препарирования для рабочей лопатки компрессора. Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. №49. С. 71-80.
4. М.В. Пивоварова, М.Ш. Нихамкин. Оптимизация схемы препарирования лопаток газотурбинных двигателей датчиками при определении динамических напряжений. Авиационный двигатель. 2024. №1 (22). С.55-63.

# ПРОГРАММА ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДИФФУЗИИ РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Нефедова О. А.<sup>а</sup>, Спевак Л. Ф.<sup>б</sup>

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской  
академии наук, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация  
<sup>а</sup>nefedova@imach.uran.ru, <sup>б</sup>lfs@imach.uran.ru*

Доклад посвящен разработке алгоритма и программы для решения системы двух уравнений параболического типа вида

$$\begin{cases} \Delta u = F(u, v), \\ \Delta v = G(u, v). \end{cases} \quad (1)$$

Подобные системы часто встречаются в теории тепло- и массопереноса реагирующих систем, в теории химических реакторов, теории горения и математической биологии.

Рассматриваются краевые задачи для системы (1) в двумерной области  $V$  с заданными на ее границе  $S = S_1 \cup S_2$  граничными условиями:

$$\begin{aligned} u|_{x \in S_1} &= u^*(\mathbf{x}), \quad v|_{x \in S_1} = v^*(\mathbf{x}), \\ \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}}|_{x \in S_2} &= p^*(\mathbf{x}), \quad \frac{\partial v}{\partial \mathbf{n}}|_{x \in S_2} = q^*(\mathbf{x}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\mathbf{x} = (x, y)$  – точка на плоскости,  $\mathbf{n}$  – вектор внешней нормали к границе  $S$ .

Разработан алгоритм численного решения задачи (1), (2) на основе метода граничных элементов и метода коллокаций. Поскольку правые части уравнений системы (1) зависят от искомых функций, алгоритм является итерационным.

Алгоритм был реализован в виде программы, написанной в интегрированной среде разработки Eclipse на языке программирования C++. Для оптимизации вычислительного алгоритма и эффективного использования ресурсов многоядерных процессоров было выполнено распараллеливание вычислений и использован стандарт параллельного программирования OpenMP. Реализация *численных* методов проводилась с использованием сборника библиотек BOOST. Разработанная программа является развитием созданной ранее программы для решения двумерных задач теории потенциала методом граничных элементов [1] и дополняет разрабатываемый авторами программный комплекс для решения краевых задач математической физики.

Для верификации алгоритма и программы были решены тестовые задачи. Результаты расчетов показали эффективность разработанных средств.

## *Литература*

1. В.П.Федотов, Л.Ф. Спевак, О.А. Нефедова. Программные продукты и системы. 2014, Т. 108, №4, 178-182.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Емельянов И. Г.<sup>1,2</sup>, Кислов А. Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия, emelyanov.ig.2016@mail.ru*

<sup>2</sup>*Уральский Федеральный Университет, 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия, a.n.kislov@urfu.ru*

Предложен метод определения ресурса стальной оболочечной конструкции при переменной термомеханической нагрузке. Напряженно-деформируемое состояние конструкции определяется путем решения нелинейной краевой задачи термопластичности для тонкостенной оболочки вращения [1]. Ресурс работы конструкций при переменных термомеханических нагрузках определяется путем использования уравнения малоциклового усталости материала [2]. Применение метода демонстрируется на конструкции муфеля, предназначенного для высокотемпературного отжига электролитической стали. При эксплуатации муфеля температура его оболочки может достигать 1000 °С, однако муфель, иногда, изготавливают из не жаропрочной стали, не предназначенной для использования при такой температуре. В отсутствие необходимых механических параметров для материала конструкции при высоких температурах применяется метод прогнозирования. Результаты решения задачи определения напряженного состояния для известных температур экстраполируются на более высокие эксплуатационные температуры, используя нейронные сети [3]. Предложенный метод позволяет оценивать ресурс различных конструкций.

### *Литература*

1. Шевченко Ю.Н., Прохоренко И.В. Методы расчета оболочек. Теория упруго-пластических оболочек при неизотермических процессах нагружения. Научова думка, 1981, 295с.
2. Manson S.S. Thermal stress and low-cycle fatigue. McGraw-Hill Inc., US, 1966, 404p.
3. I.G. Emelyanov, A.N. Kislov. Strength analysis of thin-wall structures operating in aggressive environments for prolonged periods. *Materials Physics and Mechanics*. 2022, T. 50, № 3, 475-484.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ ОТВЕРЖДАЮЩЕЙСЯ ЭПОКСИДНОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ

Колчанов Н. М.<sup>1,2</sup>, Гилёв В. Г.<sup>1,3</sup>, Русаков С. В.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, 15, ул. Букирева, Пермь, 614068, Россия

<sup>2</sup>maga-022@mail.ru

<sup>3</sup>gvg@psu.ru

<sup>4</sup>rusakov-edu@mail.ru

Композитные материалы имеют широкое применение в различных сферах, например в строительстве. В нашей работе рассматриваются композитные материалы на основе сыпучего материала, которые создаются путем пропитки их эпоксидной композицией. Важно предсказывать глубину пропитки песка, чтобы создавать композиты необходимой толщины.

Цель данной работы состоит в построении математической модели фильтрации эпоксидной смолы (далее ЭС) через дисперсную смесь (далее ДС) с учетом отверждения смолы и расчета с помощью построенной модели глубины пропитки.

Математическая модель построена с использованием закона Дарси и уравнения неразрывности. Система уравнений модели приведена ниже. Функция Бакли-Левверетта берется в виде квадрата насыщенности. В качестве начальных условий используются начальная насыщенность ЭС и начальное давление в ДС. Краевыми условиями являются давления на границах ДС[1].

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{kF_3}{\mu_3} \left( \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_3 g \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{kF_B}{\mu_B} \left( \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_B g \right) \right) = 0 \\ m \frac{\partial S_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{kF_3}{\mu_3} \left( \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_3 g \right) \right) = 0 \\ S_3 + S_B = 1 \end{cases}$$

С использованием приведенной модели исследуется пропитка песка композицией ЭС L и отвердителем ЕРН 161, смешанные в соотношении 4:1. Процесс отверждения учитывается за счет изменения вязкости от начального значения к бесконечности. Значения вязкости ЭС получены с помощью вискозиметра, а данные о пористости и проницаемости песка взяты из [2].

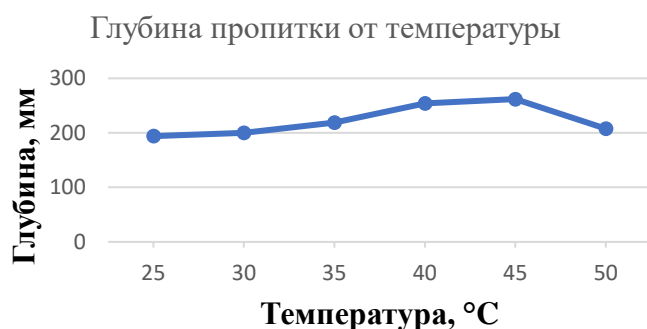


Рис. 1. График зависимости глубины пропитки от температуры при толщине слоя песка  $L = 300$  мм, давление на верхней поверхности песка  $p_1 = 10000$  Па, на нижней  $p_2 = 0$  Па, пористость песка  $m = 0.38$ , проницаемость песка  $k = 1.18 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>

В ходе моделирования обнаружено, что максимальная глубина пропитки для данной марки смолы достигается при температуре 45°C. На рисунке 1 приведен пример графика зависимости глубины пропитки от температуры.

В результате работы построена математическая модель, с помощью которой можно предсказывать глубину пропитки эпоксидной смолой. Для указанной марки смолы найдена температура, при которой глубина пропитки максимальна.

## Литература

1. Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. Недра, 1972, 288с.
2. Бузмакова М.М., Гилёв В.Г., Русаков С.В., ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ КОМПОЗИЦИИ И ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ ПЕСКА (В печати)

# О ПРИМЕНЕНИМОСТИ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Пулин А. А.

Уральский федеральный университет, 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия,  
aapuln@urfu.ru

Методы неразрушающего контроля получили широкое распространение при определении толщин покрытий во многих отраслях науки и промышленности. Контроль толщины покрытий применяется в черной и цветной металлургии, в авиакосмической и в химической промышленности, при разработке и контроле нанесения нанопокрывтий и т.д.

Наиболее востребованными в промышленности для измерения толщин  $1\div 50$  мкм являются магнитные и электромагнитные (вихретоковые) методы неразрушающего контроля [1]. Наряду с очевидными преимуществами (относительная простота и точность) использование этих методов ограничено свойствами материалов – неприменимость для немагнитных и токонепроводящих материалов. Кроме того, возникают сложности при работе с тонкими пленками толщиной  $<100$  нм – требуется повышение чувствительности применяемой аппаратуры, например, модификация вихретокового датчика с многожильным проводом обмотки [2]. Таким образом, теряется возможность одновременной работы в нм- и мкм диапазонах.

Хорошая альтернатива упомянутым – рентгенофлуоресцентный (РФ) метод. С тех пор, как на смену пропорциональным счетчикам пришли Si-pin и SDD детекторы с  $FWHM_{5.9\text{ кэВ}}$  на уровне  $130\div 180$  эВ, появилась возможность получать значения толщины покрытий с расширенной неопределенностью до  $1\div 3\%$ .

Методика расчета толщины построена на определении соотношений интенсивностей аналитических линий материалов покрытия  $I_{layer}$  и основания (подложки)  $I_{base}$  в регистрируемых спектрах рентгеновской флуоресценции. Толщина покрытия определяется как:

$$d = f(I_{layer}/I_{base}). \quad (1)$$

Понятно, что  $d$  ограничена сверху величиной насыщенного слоя, по мере приближения к которому возрастает погрешность измерений. Для ненасыщенных слоев РФ-метод позволяет контролировать толщину покрытий, выполненных из элементов с различными атомными номерами  $Z$  (от магния до свинца).

В случаях, когда аналитический сигнал подложки не регистрируется в силу ее низкого  $Z$ , для ненасыщенного слоя покрытия интенсивность флуоресценции покрытия сравнивается с интенсивностью флуоресценции массивного образца из того же материала  $I^M_{layer}$ . Напротив, когда покрытие является спектрально-нейтральным, его толщина определяется степенью поглощения в нем рентгеновской флуоресценции подложки.

Значения толщин нанопокрывтий ( $0.01\div 1$  мкм) относятся к тонким пленкам, т.е. интенсивность аналитической линии покрытия не зависит от его поглощающих свойств, а определяется только его плотностью и толщиной. Для одноэлементных покрытий связь толщины и интенсивности будет линейной, причем прямая должна проходить через начало координат.

Разработанный в УрФУ рентгенофлуоресцентный анализатор «СТАРТ-001» с вакуумируемой измерительной камерой, острофокусным рентгеновским излучателем и системой позиционирования вошел в состав Государственного первичного эталона единиц поверхностной плотности и массовой доли элементов в покрытиях ГЭТ 168-2010 [2], а позже, после его модификации – в состав Государственного первичного эталона ГЭТ 168-2015 [3]. Использование в РФ-контроле портативного РФ-анализатора позволяет проводить контроль толщин покрытий в полевых и нестационарных условиях.

## Литература

1. И.В. Наумчик и др. *Фундаментальные исследования*. 2015, № 12-5, с. 935-939.
2. Zilian Qu et al. *NDT&E International*. 2014, vol. 61, pp. 53-57.
3. В.В. Казанцев, А.С. Васильев, А.А. Пулин. Тез. докл VII Всероссийской конференции по рентгеноспектральному анализу. 2011, Новосибирск, с. 137.
4. В.В. Казанцев, С.В. Медведевских, А.С. Васильев. *Измерительная техника*. 2018, №9, с. 17-19.

# ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ОБЛУЧЕННОЙ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА ПО ИСПЫТАНИЯМ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ

Карагерги Р. П.<sup>1</sup>, Козлов А. В.<sup>1</sup>, Коновалов А. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Институт реакторных материалов», а/я 29, г. Заречный, Свердловской обл.,  
624250, Россия, karagergi\_rp@irmatom.ru

<sup>2</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, Комсомольская,  
г. Екатеринбург, 620049, Россия, avk@imach.uran.ru

В ходе эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах оболочки твэлов подвергаются сильному облучению и влиянию высоких температур. Как следствие наблюдаются структурные изменения материала, происходит распухание оболочки и формоизменение самих твэлов. Кроме этого из-за термических и контактных напряжений оболочка находится в сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС), которое вызывает дополнительное формоизменение. Частным случаем является оваллизация отдельных участков оболочки при взаимодействии пучка твэлов между собой через дистанционирующую проволочную навивку. Чтобы выполнить оценку эксплуатационных свойств оболочки твэла необходимо иметь экспериментальную информацию о деформационной способности её материала при сдавливании оболочки с учётом радиационно-индуцированных дефектов структуры и НДС. Особенно актуальным является такое исследование для материала центрального участка твэла с максимальным значением распухания оболочки.

Целью исследования является оценка деформируемости материала оболочки твэла после ее облучения в реакторе БН-600 по опытным данным на сжатие в радиальном направлении кольцевых образцов, вырезанных из оболочки твэла.

Проведены механические испытания образцов, вырезанных из ряда участков твэла после облучения в реакторе БН-600: низ, центр и верх активной зоны (НАЗ, ЦАЗ, ВАЗ). Материалом оболочки служила аустенитная сталь типа X16H20. Испытывали кольцевые образцы высотой  $5,0 \pm 0,2$  мм (высокие) и  $2,4 \pm 0,1$  мм (низкие). Высокие образцы сжимали в продольном направлении, а низкие образцы сжимали в радиальном направлении. По результатам сжатия высоких колец строили диаграмму деформационного упрочнения (ДДУ) в координатах  $\sigma_s - \lambda_p$ , а площадь под ДДУ использовали для качественной оценки деформируемости материала. Испытания низких колец сопровождали анализом НДС для уточнения параметров ДДУ и оценки предельных механических напряжений. После испытания низких колец с помощью СЭМ-анализа исследовали характер разрушения на их поверхностях изломов, а также использовали EBSD-анализ для оценки величины участка локализации деформации возле места разрушения кольца.

Установлено, что деформируемость материала оболочки снижается по мере роста повреждающей дозы. Наблюдается функциональная связь между уменьшением деформируемости и радиационной пористостью. Результаты испытания низких колец из ЦАЗ показали, что разрушение образцов, в основном, происходит транскристаллитно по радиационным порам. При этом, чем выше температура испытания, тем выше была деформируемость материала.

Проведена оценка НДС кольцевых образцов ЦАЗ с максимальным значением распухания оболочки, сжатых в радиальном направлении. Показано, что разрушение происходит с внутренней стороны стенки образца на небольшом локализованном участке, где возникают максимальные растягивающие напряжения. Отмечается роль радиационного упрочнения материала оболочки в процессах деформации и разрушении кольцевых образцов.

Полученные экспериментальные и расчётные результаты можно использовать и учитывать при моделировании механического поведения твэлов в различных схемах нагружения при эксплуатации в реакторе на быстрых нейтронах.

# О СВЯЗИ АВТОВОЛНОВЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Надежкин М. В.<sup>\*</sup>, Баранникова С. А.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
2/4, просп. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация  
<sup>\*</sup>mvn@ispms.ru*

Автоволновой подход к проблеме пластической деформации металлов и сплавов позволил получить экспериментальные данные, доказавшие универсальность наблюдаемых явлений локализации пластического течения [1]. На основании полученных результатов в физику пластичности было введено представление об автоволнах локализованного пластического течения, установлены их основные физические свойства и создана двухкомпонентная модель пластического течения [1].

В настоящей работе плоские образцы изготавливались из катаных листов алюминиевых сплавов и конструкционных сталей. Исследования локализации пластического течения были выполнены на автоматизированном лазерном измерительном комплексе, визуализирующим зоны локализованной пластической деформации в режиме реального времени [1]. Наиболее наглядной и информативной характеристикой способности материала деформироваться без разрушения является форма паттерна локализованной пластичности, наблюдение которого требует больших вычислительных ресурсов. В то же время, измерения скорости распространения ультразвука в процессе пластической деформации с использованием автоциркуляционной методики [1], является значительно более простой операцией, что может быть использовано в процессе растяжения.

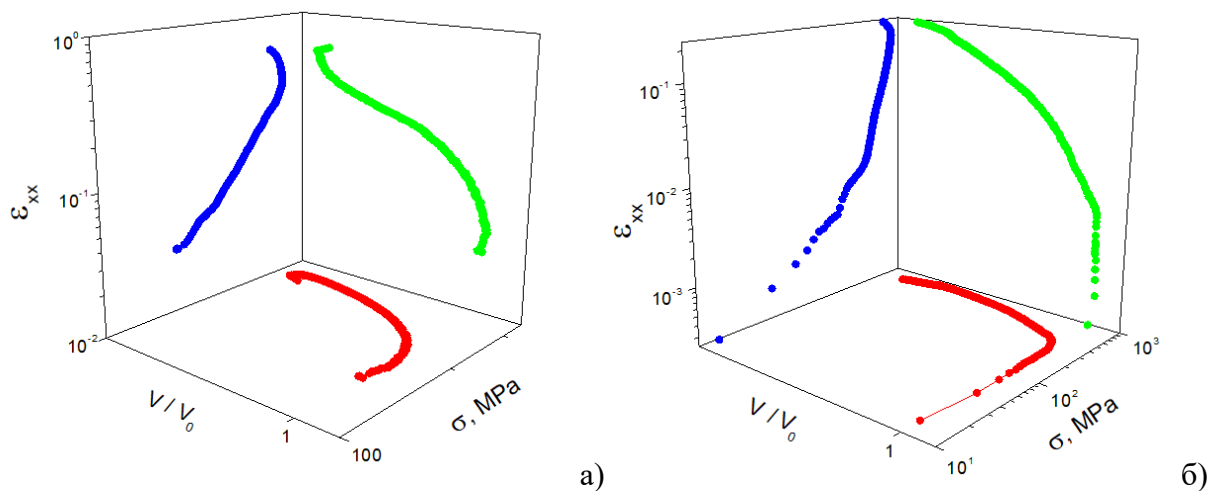


Рис. 1. Зависимости скорости ультразвука и накопления локальных деформаций  $\epsilon_{xx}$  от напряжения течения для АРМКО-железа (а) и стали 40Х13(б) в логарифмических координатах

Выявлено, что изменения скорости ультразвука и накопления деформации в очаге локализованной пластичности коррелируют со стадийностью процесса пластического течения (рис. 1). Установлен вид зависимостей скорости распространения ультразвука и характеристик локализованной пластичности в деформируемых образцах от общей деформации и напряжения течения. Доказано однозначное соответствие между стадиями пластического течения, изменениями скорости ультразвука и автоволновой модой локализованной пластической деформации, наблюдаемыми при механических испытаниях исследуемых сплавов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0011.*

## Литература

1. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008, 328с.

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПРИ ОДНООСНОМ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

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

*Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук,  
д. 4, Малый Харитоньевский пер., Москва, 101000, Россия  
I.V.Mecakarenko@Yandex.ru*

В целом ряде практически важных случаев проектирования, изготовления и эксплуатации высокоответственных объектов энергетики, авиации и ракетной техники приходится решать сложные задачи нелинейной механики малоциклового разрушения при сочетании экстремальных силовых воздействий с напряжениями  $\sigma$  и сложной пространственной формы исходных технологических и развивающихся наклонных под углом  $\alpha$  трещин различной глубины  $l$  [1-5].

В качестве первого расчетного случая в докладе рассматривается начальная наклонная поверхностная полуэллиптическая трещина в условиях одноосного нагружения. Трещина ориентирована под заданным переменным углом к первому главному напряжению от осевой силы  $P$  в относительно толстом цилиндрическом трубчатом образце (при внешнем диаметре 50 мм, внутреннем – 30 мм, глубоких трещин  $l$  от 0,5 мм до 3,0 мм и исходных углах наклона трещин  $\pi/2, 5\pi/12, \pi/3, \pi/4, \pi/6$ ).

Расчетами и экспериментами показано, что сложная трехмерная модель циклического разрушения с тремя коэффициентами интенсивности напряжений  $K_I, K_{II}, K_{III}$  ( $dl/dN = F_{I-III}\{P, \sigma, \alpha, l, K_I, K_{II}, K_{III}\}$ ) может быть сведена к модели с  $K_I$  ( $\frac{dl}{dN} = F_I\{P, l_\alpha, K_{Ie}\}$ ).

Это означает возможность анализа сложного пространственного роста трещины  $l_\alpha$  путем её проектирования на плоскость, перпендикулярную главному напряжению. При этом важно, что вязкое окончательное разрушение (с большими пластическими деформациями) происходит по модели  $I$  нелинейной механики разрушения с использованием коэффициента интенсивности деформаций  $K_{Ie}$ .

Полученные результаты позволяют упростить многовариантные решения для тел с трещинами различных ориентаций и размеров в широком диапазоне напряжений (выше и ниже предела текучести).

## Литература

1. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях. - Новосибирск, «Наука», - 2005, - 1110 с.
2. Makhutov N.A., Makarenko I.V., Makarenko L.V. Particularities a micro-mechanism of cycle elastic-plastic fracture and damage. Works of the International Conference. "In-service damage of materials, its diagnostics and prediction". Ternopil Ivan Pul'uj State Technical University, Ukraine. September 21 – 24, - 2009- 96 – 102 p.
3. Makhutov N.A., Makarenko I.V. and Makarenko L.V. Paths of the semi-elliptical inclined surface cracks under complex low-cycle loading. // 2452-3216 © 2021, Procedia Structural Integrity, - 2022, - Vol. 39, No. , pp. 266–272.
4. Махутова Н.А., Макаренко И.В., Макаренко Л.В.. Моделирование формоизменения малоциклового наклонных полуэллиптических трещин. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. №4. С. 4-11.
5. Li J., Zhang X.B., Recho N. J. – MP based criteria for bifurcation assessment of a crack in elastic-plastic materials under mixed mode I – II loading // Engin. Fracture Mech. - 2004. - V.71. - P. 329-343.



# ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА С 10 ОБ.% НАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ЧАСТИЦ SiC

Вичужанин Д. И.<sup>1</sup>, Смирнов С. В.<sup>1</sup>, Пугачева Н. Б.<sup>1</sup>, Нестеренко А. В.<sup>1</sup>, Поляков П. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия, [mtm@imach.uran.ru](mailto:mtm@imach.uran.ru)

В рамках данной работы исследован алюмоматричный композит с матрицей из сплава системы Al-Zn-Mg-Cu с наполнителем из частиц SiC. Композит синтезирован по порошковой технологии во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ). Средний размер частиц наполнителя – 12 мкм. Особенностью композита является то, что он имеет исходную ячеистую структуру, в которой частицы наполнителя расположены по границам матричных гранул, образуя сетку.

Оценка деформационной способности выполнена с использованием критерия поврежденности, предложенного В.Л. Колмогоровым [1]. В качестве основного параметра использовали безразмерная величина поврежденности  $\omega$ , которая перед началом деформации равна нулю. В момент разрушения  $\omega = 1$ . Также использовали диаграмму предельной пластичности композита, полученную ранее в работе [2].

Деформационная способность композита изучена на примере изготовления типовой детали «стакан» методом обратного выдавливания. Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния и поврежденности в процессе выдавливания, выполнено моделирование процесса методом конечных элементов в пакете DEFORM. В результате моделирования установлено, что в процессе пластического формоизменения в очаге деформации возникают зоны растягивающих напряжений, при этом поврежденность в этих зонах достигает единицы. Это говорит о высокой вероятности разрушения детали в процессе выдавливания.

Чтобы исключить разрушение изделия, предложено осуществлять выдавливание с подпором свободной поверхности. По результатам моделирования было подобрано значение подпирющего давления, равное 79,5 МПа.

Для экспериментальной проверки полученных результатов был изготовлен лабораторный штамп, особенностью которого является возможность регулирования подпирющего давления.

Выполнено выдавливание детали «стакан» с подпором и без подпора. После выдавливания без подпора получили деталь с трещинами в зонах с растягивающими напряжениями. На изделии, полученном в результате выдавливания с подпором, трещин не обнаружено. Таким образом, экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами конечно-элементного моделирования.

В процессе деформации ячеистая структура композита была разрушена, в результате частицы наполнителя оказались окружены алюминиевой матрицей. Разбиение ячеистой структуры повышает коррозионную стойкость композита. Например, в работе [3] было показано, что в случае равномерного распределения частиц наполнителя коррозионному повреждению препятствует отсутствие протяженных межфазных границ, тогда как ячеистая структура композита обеспечивает наличие развитой поверхности интерфейса за счет протяженных извилистых границ между частицами SiC и матрицей.

## Литература

1. Богатов А.А., Мижирецкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984, 144с.
2. Д.И. Вичужанин, С.В. Смирнов, А.В. Нестеренко, А.С. Игумнов. Письма о материалах. 2018, №8(1), 88-93
3. N.B. Pugacheva, E.I. Senaeva. AIP Conference proceedings. 2016, 1785, 040049

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ЭВТЕКТИКИ В АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННОМ СПЛАВЕ AlSi12

Землянов А. В.<sup>1,\*</sup>, Гатиятуллина Д. Д.<sup>1,2</sup>, Балохонов Р. Р.<sup>1</sup>, Утяганова В. Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
2/4, Академический проспект, Томск, 634055, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
36, проспект Ленина, Томск, 634050, Россия

[\\*zem.aleks99@ispms.ru](mailto:*zem.aleks99@ispms.ru)

Аддитивные технологии обладают очевидными преимуществами по сравнению с традиционными методами: практически безотходное производство, отсутствие сварных швов и других соединений в получаемом изделии [1]. Из существующих аддитивных технологий перспективной для получения высококачественных изделий, обладающих низкодефектной структурой, является электронно-лучевое аддитивное производство (ЭЛАП) [2]. Полученные с помощью ЭЛАП изделия обладают сложной многомасштабной микроструктурой, характеризующейся наличием границ раздела разного типа и геометрии, а также термомеханической несовместимостью свойств [3]. В рамках подхода многоуровневого моделирования структура аддитивных композиционных материалов учитывается в расчетах в явном виде. В настоящей работе исследовано деформационное поведение эвтектики силумина AlSi12, полученного электронно-лучевой проволоочной печатью. На масштабном уровне нескольких сотен нанометров материал эвтектики представляет собой дисперсно-упрочненный композит «алюминиевая матрица – частицы кремния» (рисунок 1а, б).

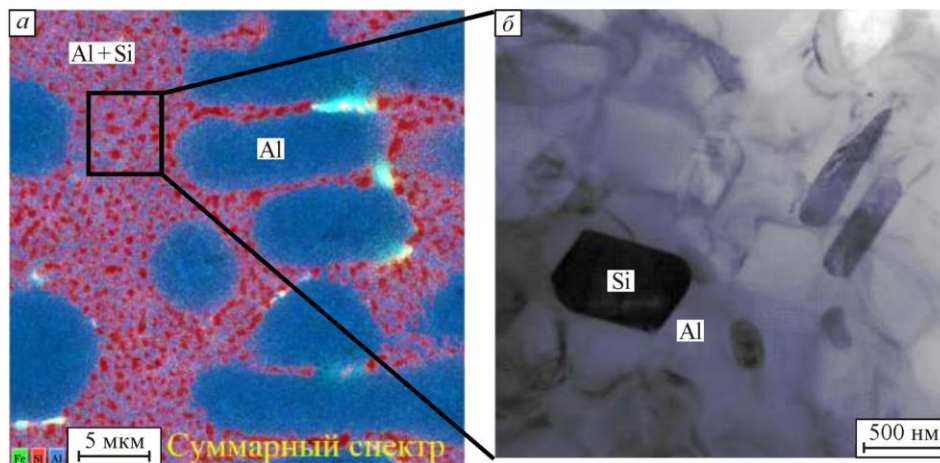


Рис. 1. Дендритная структура и эвтектический каркас (а) и материал эвтектики сплава AlSi12, изготовленного с помощью проволоочного электронно-лучевого аддитивного производства (б)

Двумерные динамические краевые задачи о нагружении композита решаются в постановке плоского напряженного состояния в конечно-элементном пакете ABAQUS/Explicit. Используются изотропные модели упругопластического алюминия и упруго-хрупких пластин кремния с учетом разрушения при достижении критической величины накопленной пластической деформации и интенсивности напряжений, соответственно. Проведены численные расчеты как из начального недеформированного состояния, так и после охлаждения эвтектики. Установлена стадийность деформирования эвтектики с учетом остаточных напряжений и формирование областей объемного растяжения, сжатия и чистого сдвига в алюминиевой матрице.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00222, <https://rscf.ru/project/23-11-00222/>.

## Литература

1. W. Huang, S. Chen, J. Xiao, X. Jiang, Y. Jia. *Optics Laser Technology*. 2021, V. 134, 106627.
2. V. Utyaganova, A. Filippov, S. Tarasov. *Materials Characterization*. 2021, V. 172, 110867.
3. R. Balokhonov, A. Zemlianov, V. Utyaganova, D. Gatiyatullina, V. Romanova. *Metals*. 2023, V. 13, 1465.

# ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И СОДЕРЖАНИЯ БОРА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

Дударева А. А.<sup>1</sup>, Бушуева Е. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», 20, пр-т К. Маркса, г. Новосибирск, 630073, Россия, dudareva-alina@mail.ru

Хромоникелевые аустенитные стали широко применяются в нефтегазовой и химической промышленности для изготовления деталей конструкций цилиндрической формы. Для увеличения срока эксплуатации таких изделий в условиях агрессивного и абразивного воздействия необходимо защитить поверхность, находящуюся в зоне контакта. Нанести защитные слои на внутреннюю часть трубы является сложной технической задачей. Одним из решений является создание модифицированных слоев на поверхности листовых заготовок с формированием трубного профиля. Особенностью при изготовлении таких профилей является проведение пластической деформации заготовки представляющей композицию: упрочненный слой - основной материал. Кроме того, полученные заготовки должны обладать высокой коррозионной стойкостью, высокой адгезией и износостойкостью. Горячая пластическая деформация позволяет получать листовые заготовки, но степень ее воздействия на структуру и свойства модифицированных слоев изучена недостаточно. Согласно литературным данным оптимальной температурой для горячей пластической деформации является диапазон 950...1100°C [1 - 4].

В данной работе в качестве перспективного метода модифицирования поверхностного слоя использовалась вневакуумная электронно-лучевая наплавка, выполненная на ускорителе электронов промышленного типа ЭЛВ-6 ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера. В качестве упрочняемого материала была выбрана сталь 12X18H9T. Наплавляемые порошковые смеси состояли из хрома и бора различных концентраций.

Для формирования листовых заготовок полученные образцы подвергались горячей прокатке при температуре 950 °С с шагом деформации 5 %. Максимальная степень деформации составила 70 %.

ДюрOMETрические исследования показали, увеличение микротвердости модифицированных слоев в 4 раза после пластической деформации в сравнении с основным материалом 12X18H9T.

*Исследования выполнены на оборудовании ЦКП "Структура, механические и физические свойства материалов" (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034, 075-15-2021-698).*

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России (проект FSUN-2023-0009).*

## Литература

1. Губенко С. И. Особенности пластического поведения боридных фаз при производстве труб для атомной энергетики / С. И. Губенко, В. Н. Беспалько, Е. В. Жиленкова // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2011. - № 7. - С. 70-74.
2. Козлова Т. А. Влияние температуры прокатки на структуру, фазовый состав и микротвердость аустенитной хромоникелевой стали 08X17H14M2 / Т. А. Козлова, Е. С. Мельников, В. С. Кошовкина ; науч. рук. Е. Г. Астафурова // *Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 21-24 апреля 2015 г.* — Томск : Изд-во ТПУ, 2015. — С. 128-130.
3. Гребенников Р. В., Чиркин А. В. Влияние скорости кристаллизации и отжига на пластические свойства высокобористой стали. — 1965.
4. Чурюмов А. Ю. и др. Исследование структуры и механических свойств при повышенных температурах коррозионно-стойкой стали с высоким содержанием бора // *Физика металлов и металловедение*. — 2014. — Т. 115. — №. 8. — С. 862-862.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШАРОВ В УЗЛЕ ТРЕНИЯ ЧЕТЫРЕХШАРИКОВОЙ МАШИНЫ

Антимонов А. М.<sup>1</sup>, Пушкарева Н. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия, [nbpush@mail.ru](mailto:nbpush@mail.ru)

Стандартные исследования трибологических свойств смазочных материалов осуществляются на четырехшариковой машине трения [1]. Узел трения такой машины приведен на рисунке и представляет собой пирамиду из контактирующих друг с другом стальных шаров одного диаметра. Технологическая нагрузка при исследованиях обеспечивается приложением силы  $F$  на шпинделе. Верхний шар зажат в шпинделе силой  $F'$  и вращается вместе с ним относительно трех нижних шаров. Нижние шары прижимаются друг к другу силою затяжки  $F''$  и

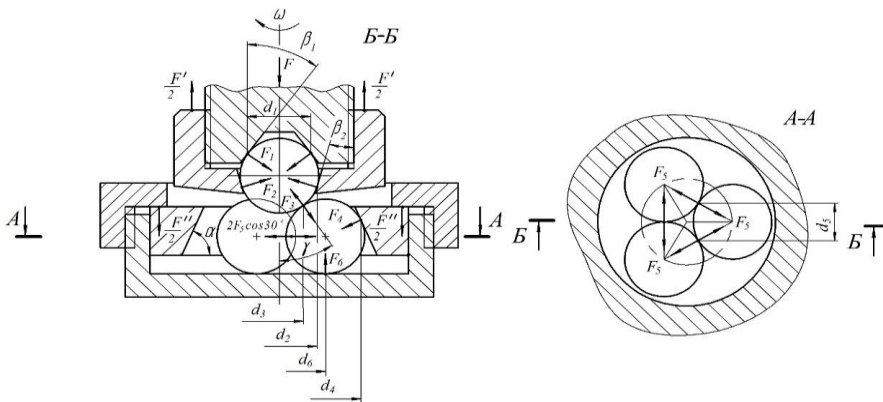


Рис. 1. Узел трения четырехшариковой машины

должны находиться в неподвижном состоянии.

Математическое описание такого состояние шаров представлено в виде уравнений равновесия моментов трения от сил  $F_1 - F_6$  на контактных поверхностях [1, 2]:

$$M_1 + M_2 \geq M_3 \quad (1),$$

$$M_4 + M_6 \geq M_3 \quad (2),$$

$$M_4' + M_5' \geq M_3' \quad (3),$$

$$M_4'' + M_5'' + M_6'' > M_3'' \quad (4)$$

Первым уравнением задано отсутствие перемещения верхнего шара относительно шпинделя. Вторым условием исключается общее вращение трех нижних шаров вокруг их общей оси. Третьим и четвертым условиями «запрещается» поворот каждого нижнего шара относительно собственных вертикальной и горизонтальной осей. Из уравнений равновесия моментов получены следующие выражения:

$$\frac{f_3}{f_{12}} \leq \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} \left[ \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_1} + \frac{F'}{F} \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_1} + \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_2} \right) \right]; \operatorname{tg} \beta_1 \leq \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} \left( 1 + \frac{F'}{F} \right) / \left( \frac{f_3}{f_{12}} - \frac{F'}{F} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma} \right);$$

$$\frac{f_3}{f_{456}} \leq 1 + 2 \sin \gamma \left( \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) + \frac{2F''}{F} \left( \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2 \sin \gamma} + \frac{1}{\cos \alpha} + 1 \right) \cdot \cos \gamma;$$

$$\frac{f_3}{f_{456}} \leq 1 + \frac{F''}{F} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \gamma} \cdot \sqrt{3}; \quad \frac{f_3}{f_{456}} \leq 1 + \frac{2 \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{2F''}{F} \left( 2 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}} \right),$$

где  $f_3, f_{12}, f_{456}$  – соответственно коэффициенты трения на поверхностях контакта верхнего шара с нижними шарами, верхнего шара со шпинделем и накидную гайкой, нижних шаров между собой, опорной поверхностью и нажимным кольцом.

Использование этих выражений позволяет моделировать статическое состояние шаров в зависимости от условий трения на контактных поверхностях, а также исследовать влияние силовых и геометрические параметров на это состояние.

## Литература

- ГОСТ ISO 20623-2013 Нефтепродукты. Жидкие смазочные материалы. Определение противозадирных и противоизносных свойств с использованием четырехшариковой машины (европейские условия). М: Из-во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2014, 16 с.
- А.А. Лаптев, А.М. Антимонов. Геометрические параметры узла трения четырехшариковой машины. Технология производства машин: Межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2003, с.122-128.
- A. M. Antimonov, N. B. Pushkareva, E. G. Reshetnikov. Four-Ball Machine Friction Unit Geometrical Parameters. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. № 9783319956299. pp 801-809.

## ВОЗМОЖНОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СТРУКТУР СПЛАВА Fe-3%Si

Драгошанский Ю. Н.<sup>1</sup>, Пудов В. И.<sup>1</sup>, Поволоцкая А. М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИФМ УрО РАН, 18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Россия,  
dom736@outlook.com, pudov@imp.uran.ru

<sup>2</sup>ИМАШ УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 62009, Россия,  
anna.povolotskaya.68@mail.ru

Важнейшим материалом для развития современной электротехники являются магнитомягкие сплавы на основе Fe-Si, производимые в объеме 1 млн. тонн в год. В настоящее время выявлены три основных направления совершенствования свойств этих сплавов: нанесение магнитоактивных покрытий, термомагнитная обработка, введение упорядоченных деформаций [1-3]. Дальнейшее их развитие требует оптимизации.

В данной работе исследованы новые составы электроизоляционных покрытий на основе магний-фосфатов и оксидов кремния. Обладая малыми коэффициентами теплового расширения и высокой адгезией к металлу, они позволяют создавать большой эффект снижения магнитных потерь (6-9 %).

Обнаружено, что при термомагнитной обработке (ТМО) в переменном поле  $H$  достаточной амплитуды, приложенном под острым углом  $\varphi$  к оси текстуры, магнитные потери уменьшаются и вдоль, и поперёк оси воздействовавшего при обработке поля. Раскрыт физический механизм этого изотропного эффекта. Он связан с тем, что под действием поля ось пар наиболее подвижных атомов Si-Si ориентируется вдоль  $H$ , атомы кремния выходят из устойчивых равновесных положений в решётке, и при ослабевших силах связи взаимодействие с движущимися доменными границами рассеивает эти атомы по образцу. Такое разрушение нанокластеров приводит к облегчению движений доменных границ при перемагничивании образцов в любом направлении (рис. 1). В частности, после ТМО при 400 °С, медленном охлаждении, амплитуде  $H = 40$  кА/м, угле  $\varphi = 25^\circ$  в ленте сплава Fe-3%Si толщиной 0,3 мм магнитные потери  $P_{1,7/50}$  вдоль и поперёк оси поля уменьшаются на 12 и 9 % соответственно.

К более значительному снижению магнитных потерь (порядка 20 %) при перемагничивании стали приводит введение зон упорядоченных деформаций лазерной обработкой. Предложен и опробован эффективный способ повышения термической стабильности этого воздействия.

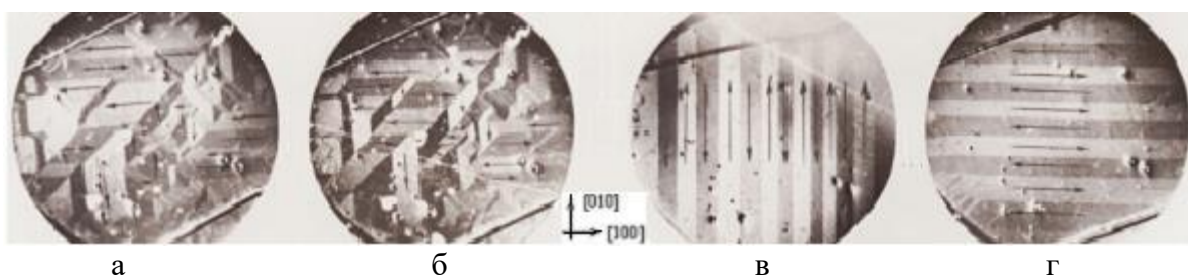


Рис. 1. Доменная структура Fe-3%Si (001) после ТМО в отсутствии (а, б) и в присутствии (в, г) переменного поля  $H$  с последующим размагничиванием вдоль [010] (в) и [100] (г)

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (темы № 122021000034-9 («Магнит»), № 122021000030-1 («Диагностика»), № 124020600045-0).

### Литература

1. Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов. Письма о материалах. 2018, Т. 8, Вып.1, 66–70.
2. В.В. Губернаторов, Ю.Н. Драгошанский, Т.С. Сычёва. Физика металлов и металловедение. 2019, Т. 120, Вып. 8, 787–792.
3. Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов. Доклады РАН. 2017, Т. 476, Вып. 4. 26–29.

# МОДЕЛИ, ПАРАМЕТРЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ К МАТЕРИАЛАМ И ЭЛЕМЕНТАМ КОНСТРУКЦИЙ

Туманов А. В., Шлянников В. Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
2/31, ул. Лобачевского, Казань, РФ  
[tymanoff@rambler.ru](mailto:tymanoff@rambler.ru), [shlyannikov@mail.ru](mailto:shlyannikov@mail.ru)

В настоящей работе представлен комплекс экспериментальных, теоретических и численных исследований характеристик деформирования и разрушения конструкционных сплавов при различных условиях статического, циклического и термомеханического нагружения. Сформулированные и реализованные задачи отнесены к мезо и микро масштабам механики трещин. В практику использования метода конечных элементов введены новые алгоритмы мультифизических расчетов и модели градиентной теории пластичности и фазовых полей разрушения (Рис.1). На основе сформулированных обобщенных модельных представлений разработана расчетно-экспериментальная методология определения параметров и характеристик сопротивления росту трещин при статическом и циклическом нелинейном деформировании. Обоснование и верификация предлагаемых концепций даны в основе результатов развернутых экспериментальных исследований, выполненных на образцах различной геометрии и имитационных моделях элементов конструкций с привлечением методов цифровой корреляции изображений и количественной фрактурграфии. Представлен анализ и моделирование доминирующих механизмов циклического разрушения в широком диапазоне температур испытаний.

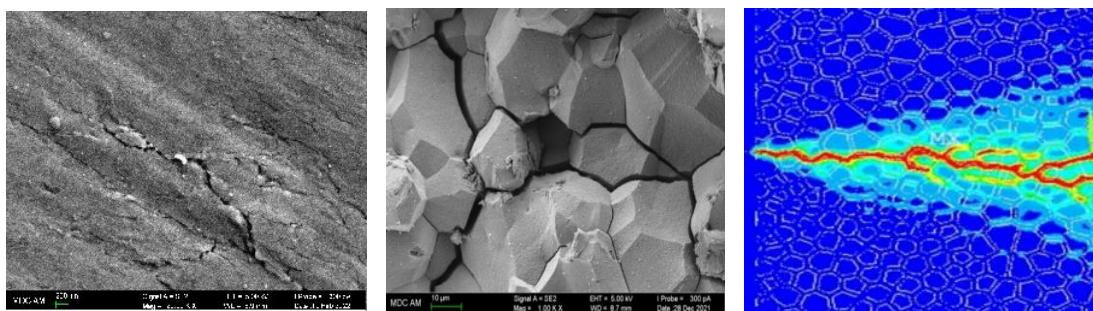


Рис. 1. Моделирование межзёрненного доминирующего механизма разрушения

В порядке практических приложений на основе положений механики поврежденной среды разработана комплексная методология оценки состояния материалов в условиях взаимодействия усталости и ползучести при сложном напряженном состоянии. По результатам состоявшихся теоретических, экспериментальных и численных исследований сформулированы рекомендации и даны примеры применения разработанной методологии для решения задач оценки остаточной долговечности элементов конструкций при эксплуатации в условиях сложного напряженного состояния при повышенных температурах.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00475, <https://rscf.ru/project/24-29-00475/>»

## Литература

1. Shlyannikov, V. Sulamanidze, A. Kosov, D. Isothermal and thermo-mechanical fatigue-crack-growth analysis of XH73M nickel alloy. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, 129, 104182 <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.104182>.
2. V. Shlyannikov, E. Martínez-Pañeda, A. Tumanov, R. Khamidullin, Mode I and mode II stress intensity factors and dislocation density behaviour in strain gradient plasticity, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Volume 116, 2021, 103128, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103128>.
3. V. Shlyannikov, A. Tumanov, Creep damage and stress intensity factor assessment for plane multi-axial and three-dimensional problems, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 150, 2018, Pages 166-183, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.06.009>.

# ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ТЕЛАХ С ТРЕЩИНАМИ, СВОЙСТВА КОТОРЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫ К ВИДУ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Ломакин Е. В.<sup>1</sup>, Королькова О. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва, 119991, Россия, [evlomakin@yandex.ru](mailto:evlomakin@yandex.ru), [ol.shendrigina@mail.ru](mailto:ol.shendrigina@mail.ru)

Разработаны математические теории деформирования и разрушения сложных сред, к которым, прежде всего, относятся неоднородные среды, содержащие микротрещины, поры, включения, армирующие элементы и другие особенности структуры. Экспериментальные исследования механических свойств сред, содержащих неоднородности структуры, свидетельствуют о чувствительности свойств данных сред к виду нагружения или виду деформирования, поскольку поведение неоднородностей существенным образом зависит от характера внешних воздействий. Кроме того, в данных средах проявляется взаимосвязь процессов сдвигового и объемного деформирования. Одним из проявлений этой взаимосвязи может быть объемное расширение среды при действии сжимающих напряжений. Данные свойства обнаруживаются у горных пород, бетона, огнеупорных керамик, чугуна, конструкционных графитов, некоторых композиционных материалов и многих других. Сформулированы соответствующие определяющие соотношения для описания нелинейно-упругого и упругопластического деформирования рассматриваемого класса сред, в рамках которых определены условия единственности решения краевых задач. Продемонстрировано хорошее соответствие между теоретическим описанием и результатами экспериментальных исследований.

Показано, что некоторые традиционные формулировки краевых задач, а также методы их решения, в общем случае, не могут быть использованы. В частности, это относится к задачам продольного сдвига, кручения, механики разрушения. Сформулированы новые корректные подходы и получены решения ряда задач, на основе которых установлено, что в условиях действия касательных напряжений величина объемной деформации вблизи отверстий и других концентраторов напряжений может быть сравнимой с величиной деформации сдвига. При этом зависимость деформационных свойств сред от вида напряженного состояния существенным образом влияет на распределение напряжений и деформаций в твердых телах.

Рассмотрены задачи плоской деформации, плоского напряженного состояния и продольного сдвига тел с трещинами, исследованы поля напряжений, деформаций и перемещений в окрестности трещин. На основе решения данных задач исследована зависимость коэффициентов интенсивности напряжений от чувствительности деформационных свойств материалов к виду нагружения. Получены новые решения ряда задач, позволившие выявить особенности напряженно-деформированного состояния в телах с трещинами, свойства которых чувствительны к виду напряженного состояния. Задачи о трещинах продольного сдвига решались в новой обобщенной формулировке, в которой все три компоненты вектора перемещений представляют собой функции координат и подлежат определению. Обнаружено раскрытие трещин при действии касательных напряжений и на основе данного эффекта предложен возможный механизм, объясняющий объемное расширение среды при действии сжимающих напряжений. Представлены результаты расчетов инвариантного интеграла и исследовано влияние на его значения чувствительности свойств материалов к виду напряженного состояния.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 20-11-20230-П.

# МЕХАНИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА КАРБОНИЗИРОВАННОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИУРЕТАНА ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ

Иванов Я. Н.<sup>1,3</sup>, Чудинов В. С.<sup>1,2</sup>, Шардаков И. Н.<sup>2</sup>, Беляев А. Ю.<sup>2</sup>, Морозов И. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, 15, ул. Букирева, Пермь, 614068, Российская Федерация, [ivanovya@psu.ru](mailto:ivanovya@psu.ru)

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, 1, ул. Академика Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация

<sup>3</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29, ул. Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация

Ионно-плазменная обработка позволяет формировать на поверхности полимерных материалов карбонизированный слой, обладающей хорошей биосовместимостью [1, 2]. При обработке реальных медицинских изделий, поверхность которых имеет криволинейную форму, имплантация ионов может происходить под разными углами к поверхности. Данная работа посвящена исследованию механических, структурных и прочностных характеристик карбонизированного слоя, полученного методом имплантации ионов азота высокой энергии под разными углами к поверхности полиуретана.

Толщина карбонизированного слоя определялась теоретически с помощью программного пакета SRIM/TRIM, а также экспериментально с помощью сканирования поверхности поперечного сечения зондом атомно-силового микроскопа. Модуль упругости карбонизированного слоя был определен с помощью эксперимента на одноосное растяжение. Статическую прочность карбонизированного слоя изучали с помощью растягивающего устройства, встроенного в цифровую систему оптической микроскопии. Проведены ресурсные испытания для оценки сопротивления усталостному разрушению карбонизированного слоя. Исследована морфология поверхности карбонизированного слоя после испытаний на прочность.

По результатам исследований получены характеристики жесткости, прочности и морфологии поверхности карбонизированного слоя, сформированного при разных дозах и углах ионного пучка к поверхности образца. Показано, что угол имплантации ионов влияет на морфологию поверхности полиуретана. Изменение угла падения ионного пучка при ионно-плазменной обработке не оказывает значительного влияния на модуль упругости карбонизированного слоя. Статическая прочность и сопротивление усталостному разрушению возрастают по мере уменьшения угла падения ионного пучка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/875 от 04.04.2022г. и в рамках государственного задания ИМСС УрО РАН.

## *Литература*

1. Kondyurin A. V., Bilek M. *Ion beam treatment of polymers application aspects from medicine to space. Elsevier Science Limited, 2008, 317 pp.*
2. Чудинов В.С., Кондюрина И.В., Терпугов В.Н. и др. *Медицинская техника, 2020, № 4, С. 19-21.*



# ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

Зыкова А. П., Панфилов А. О., Воронцов А. В., Тарасов С. Ю.

*Институт физики прочности и материаловедения, 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия, zykovaap@ispms.ru*

Титановые сплавы, в частности ВТ6, хорошо подходят для аддитивного производства (АП) благодаря их применению в биомедицине и компонентах аэрокосмической отрасли, которые выигрывают от конструктивных преимуществ аддитивного производства. Эти сплавы сочетают в себе высокую коррозионную стойкость и биосовместимость с требуемыми механическими свойствами, такими как высокое отношение прочности к весу. Во время аддитивного производства в материале протекает множество фазовых и структурных процессов, связанных с особенностями производства: предварительным нагревом, плавлением, охлаждением и частичным повторным плавлением каждого предыдущего слоя изделия. Таким образом, технология АП создает определенную микроструктуру и текстуру, являющуюся следствием циклического температурного воздействия. Однако, специфические условия процесса и высокие температурные градиенты, в каждом конкретном методе АП, могут приводить к специфической микроструктуре ВТ6: 1) образованию мартенситной  $\alpha'$ -фазы [1]; 2) образованию метастабильных фаз  $\alpha''$  и  $\omega$  [2,3]; 3) сегрегация Al из-за быстрого затвердевания и воздействие тепла при нанесении следующих слоев приводят к выделению интерметаллической фазы  $\alpha_2$  [1]; обогащению легирующими элементами (Al, V и т.д.) на межфазной границе [4].

Термическая обработка после 3D печати может быть использована для улучшения микроструктурных характеристик деталей, изготовленных аддитивным способом, в том числе из титановых сплавов  $\alpha/\beta$ . Поэтому целью работы являлось исследование влияния различных режимов термической обработки на формирование микроструктуры, текстуры, фазового состава и механических свойств сплава ВТ6, полученных электронно-лучевой аддитивной технологией (ЭЛАТ).

Изучена структурная эволюция образцов ВТ6 изготовленного ЭЛАТ, подвергнутых закалке и нормализации при температуре 900 °С. Установлено, что первичная  $\beta$ -фаза представлена текстурой кристаллизации, при которой направление  $\langle 100 \rangle_\beta$  параллельно направлению выращивания изделия. Микроструктура ВТ6, полученного ЭЛАТ, неоднородна и характеризуется такими структурно-фазовыми состояниями как: зернограничная  $\alpha$ -фаза, колонии  $\alpha/\beta$  пластин,  $\alpha/\alpha''$  и  $\alpha/\alpha_2$ .

Закалка ВТ6 при 900 °С с последующим охлаждением в воде привела к сохранению структуры зернограничной  $\alpha$ -фазы и  $\alpha/\alpha_2$ , тогда как  $\alpha/\beta$  превратилась в  $\alpha/\alpha'$ . Нормализация ВТ6 при 900 °С с последующим охлаждением на воздухе помимо первичной  $\alpha$ -фазы привела к образованию  $\alpha''$ -Ti и  $\omega$ -Ti. Ориентационное соотношение  $\alpha$ -Ti зависело от интенсивности нагрева таким образом, что количество зерен типа 4-2 с углами разориентировки 60, 60.8, 63.3° увеличивалось от исходного образца ВТ6 к нормализованному. После закалки повышаются значения предела прочности и пластичности в среднем на 10%, что приводит к наилучшему их соотношению, по сравнению с ВТ6 без термообработки.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2024-0001.*

## *Литература*

1. Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T., Van Humbeeck J., Kruth J.-P. *Acta Materialia*. 2010, 58, 3303–3312.
2. Zeng L., Bieler T.R. *Materials Science and Engineering A*. 2005, 392, 403–414.
3. Murr L.E., Quinones S.A., Gaytan S.M., Lopez M.I., Rodela A., Martinez E.Y., Hernandez D.H., Martinez E., Medina F., Wicker R.B. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2009, 2, 1, 20–32.
4. Safdar A., Wei L.-Y., Snis A., Lai Z. *Materials Characterization*. 2012, 65, 8–15.

# ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО АРМИРОВАНИЯ

Власов Д. Д.<sup>1</sup>, Татусь Н. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, д. 4, М. Харитоньевский пер, Москва, 101000, Россия, danila\_vlasov\_98@mail.ru

Известно, что наибольшей эффективностью обладают композитные структуры с однонаправленным армированием, поскольку заявленные высокие механические характеристики реализуются вдоль волокон. Однако сильная анизотропия свойств оказывается вредной при возникновении неоднородных полей напряжений или наличии в структуре концентраторов, таких как отверстия или места крепления. Частичное решение этой проблемы - применение квазиизотропных укладок вида  $[\pi/n]$  [1], либо схем «double-double»  $[\pm\alpha/\pm\beta]$  [2]. Но жесткость таких композитов практически вдвое ниже, чем у однонаправленных.

Значительно возрастает эффективность при укладке волокон по криволинейным траекториям [3]. Существуют схемы армирования вдоль линий наибольшего главного напряжения, траекторий нагрузки, потока воды и др. Получаемые структуры переменной жесткости демонстрируют эффекты снижения концентрации напряжений и увеличения прочности конструкций. Общий недостаток этих подходов – высокая сложность их практической реализации.

В настоящей работе на примере композитной пластины с центральным отверстием

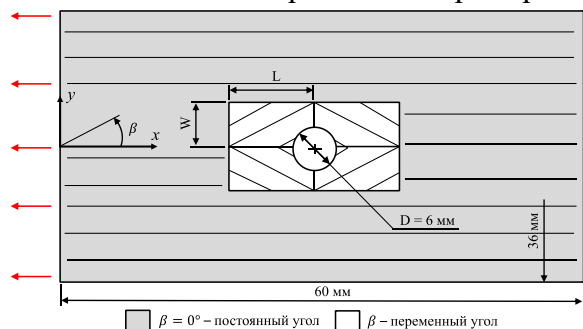


Рис. 1. Гибридная структура армирования

рассматривается альтернативный класс структур переменной жесткости с измененным (переменным) углом однонаправленного армирования в локальных зонах (рис. 1). Данный подход значительно упрощает проектирование и создание оптимальных композитных структур с повышенными эксплуатационными характеристиками. Технологическое преимущество такого подхода состоит в том, что в локальных зонах

используется тот же однонаправленный препрег, из которого формируется вся пластина. А концентрация напряжений у отверстия снижается из-за локального снижения жесткости.

Для определения эффективности и обоснования применимости нового метода были проведены численные расчеты методом конечных элементов. Поскольку пластина симметрична, для упрощения моделирования была рассмотрена четвертая ее часть с размерами 30x18 мм. и отверстием диаметром 6 мм. Цель расчетов состояла в определении оптимального угла  $\beta$  и эффективной формы и размера зоны гибридного армирования.

Результаты расчетов показали значительное увеличение прочности композитной пластины с гибридным армированием, а также снижение концентрации напряжений у отверстия. Была доказана применимость предлагаемого подхода, а также были определены оптимальные формы локальных зон и значения  $W$ ,  $L$ ,  $\beta$ .

**Финансовая поддержка.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00318 (Гибридные биоподобные композитные структуры переменной жёсткости как альтернатива квазиизотропным материалам), <https://rscf.ru/project/23-23-00318/>.

## Литература

1. S.W. Tsai, J.D.D. Melo. An invariant-based theory of composites. *Compos. Sci. Technol.* 2014.
2. S.W. Tsai. Double-Double: New Family of Composite Laminates. *AIAA Journal.* 2011. Vol. 59. No. 11.
3. A. Malakhov, A. Polilov, J. Zhang, Z. Hou, X. Tian. A modeling method of continuous fiber paths for additive manufacturing (3D printing) of variable stiffness composite structures. *Applied Composite Materials.* 2020. DOI: 10.1007/s10443-020-09804-8.

## ЗАДАЧА МАРШРУТИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ (МИНИМАКСНАЯ ПОСТАНОВКА)

Ченцов А. Г.<sup>а,б</sup>, Ченцов П. А.<sup>а,б</sup>

<sup>а</sup>ИММ УрО РАН, 16, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация

<sup>б</sup>Уральский федеральный университет, 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

В задачах авиационной логистики, связанных с последовательным посещением пунктов при ограничениях предшествования естественно возникает вопрос о выполнимости системы заданий. При этом характерным условием разрешимости является ограничение на дальность беспосадочного полета; предполагается, что в каждом из пунктов посещения осуществляется дозаправка с целью продолжения полета. Для получения ответа на упомянутый вопрос о выполнимости всех заданий естественно применить минимаксную задачу маршрутизации, в которой упомянутое ограничение (на дальность беспосадочного полета) отсутствует, а критерий определяется в виде максимума аналогичных дальностей при перелетах между соседними (на выбранном маршруте) пунктами. Исходная задача разрешима тогда и только тогда, когда минимакс «текущих» дальностей не превосходит допуска, определяемого ограничением упомянутой исходной задачи. Если нужное неравенство выполняется, то в качестве самого допустимого решения исходной задачи с допуском по дальности может использоваться решение минимаксной задачи маршрутизации.

Разумеется, круг прикладных задач, обслуживаемых минимаксной постановкой, достаточно широк, а потому мы сосредоточимся на исследовании упомянутой постановки, получая в простейшем случае минимаксную задачу курьера (см. [1,2]); в более сложной ситуации реализуется минимаксная задача последовательного обхода мегаполисов (непустых конечных множеств); см. [3,5]. Более общие постановки задач маршрутизации с неаддитивным критерием приведены в [6]. В минимаксной задаче о посещении мегаполисов, имеющей ощутимую размерность, весьма непросто указать «хорошую» эвристику. Надежный вариант решения связан с динамическим программированием (ДП), однако трудности вычислительной реализации сказываются и здесь в очень жесткой форме. В этой связи представляет интерес решение минимаксной задачи «по частям», т.е. решение с применением декомпозиции (см. [3,4]). Это позволяет в «диапазонной» задаче ощутимой размерности получить решение за приемлемое время и, одновременно, указать верхнюю оценку минимакса в полной задаче (без декомпозиции). Кроме того, в некоторых случаях исходной задачи по соображениям прикладного характера могут возникать требования, связанные с первоочередным выполнением каких-то заданий (напомним в этой связи аддитивную задачу о термической резке деталей на машинах с ЧПУ [7, часть 1], где по технологическим требованиям следует в число первоочередных включать т.н. длиномерные детали; см. ([7, §1.3.3])). В минимаксных задачах, ориентированных на потребности малой авиации также могут возникать соображения по выделению первоочередных заданий, что приводит к постановкам с декомпозицией. Напомним в этой связи, что в [3,4] на основе ДП построено решение задачи, связанной с оптимизацией композиционных решений, которое может представлять интерес для инженерных приложений. Упомянутые конструкции излагаются в докладе; более того, на основе решения двухкластерной минимаксной задачи построен алгоритм, позволяющий решать аналогичную задачу с произвольным числом кластеров (зон) за вполне приемлемое время.

### Литература

1. Меламед И. И., Сергеев С. И., Сигал И. Х. Задача коммивояжера. Вопросы теории // Автоматика и телемеханика. 1989. Вып. 9. С. 3–34.
2. Сергеев С. И. Алгоритмы решения минимаксной задачи коммивояжера. I. Подход на основе динамического программирования // Автоматика и телемеханика. 1995. Вып. 7. С. 144–150.

3. Ченцов А.Г. Задача маршрутизации «на узкие места» с системой первоочередных заданий // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2023. Т. 61. С. 156–186.
4. Ченцов А.Г., Ченцов А.А. Минимаксная задача маршрутизации с системой первоочередных заданий // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2023. Т. 62. С. 96–124.
5. Ченцов А. Г., Ченцов А. А. Маршрутизация перемещений при динамических ограничениях: задача «на узкие места» // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2016. Т. 26. Вып. 1. С. 121–140.
6. Ченцов А. Г., Ченцов А. А., Сесекин А. Н. Задачи маршрутизации перемещений с неаддитивным агрегированием затрат. М.: Ленанд, 2021.
7. Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А. Оптимальная маршрутизация инструмента машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением. Математические модели и алгоритмы. Екатеринбург: УрФУ, 2020.

# ХАРАКТЕР АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ КОМПОЗИТОВ $ZrB_2$ -SiC-TaB<sub>2</sub> С ГОМОГЕННОЙ И ДВОЙНОЙ СТРУКТУРОЙ

Шмаков В. В.<sup>1,2</sup>, Буяков А. С.<sup>1</sup>, Буякова С. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия, [vvshmakov@ispms.ru](mailto:vvshmakov@ispms.ru), [alesbuyakov@gmail.com](mailto:alesbuyakov@gmail.com), [sbuyakova@ispms.ru](mailto:sbuyakova@ispms.ru)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 20, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия

Известно, что абразивное изнашивание керамик осуществляется преимущественно путем откалывания и уноса фрагментов материала при образовании поверхностных трещин под действием ударных нагрузок, оказываемых абразивными частицами [1]. Исходя из этого, следует предположить, что увеличение стойкости к образованию и развитию трещин хрупких керамик способно увеличить и толерантность к абразивному изнашиванию.

Ранее, в работе [2] было показано, что организация двойной композиционной структуры в керамиках системы  $ZrB_2$ -SiC-TaB<sub>2</sub>, где матрица и наполняющие ее включения являются композитами, обеспечивает кратное увеличение трещиностойкости, по сравнению с традиционным композитом, структура которого сформирована по принципу однофазных включений в однофазной матрице. Целью настоящей работы является изучение характера изнашивания под абразивным воздействием композитов  $ZrB_2$ -SiC-TaB<sub>2</sub>, имеющих традиционную, и двойную структуру.

Композит с гомогенным распределением компонентов получали механическим смешиванием исходных порошков. В качестве матрицы двойных композитов выступала система  $ZrB_2$ -SiC. Включения системы TaB<sub>2</sub>-SiC получали методом распылительной сушки и смешивали с матричным порошком в магнитном смесителе в среде этанола. Исследуемые композиты  $ZrB_2$ -SiC-TaB<sub>2</sub> были получены методом спекания под давлением. Испытание на абразивное изнашивание проводили в соответствии со стандартом ASTM G65-04.

Обнаружено, что абразивное изнашивание композита с гомогенным распределением компонентов характеризуется образованием подповерхностных трещин, с последующим отрывом фрагментов материала с размерами, превышающими размеры включений, рисунок 1а. В то время как изнашивание «двойных» композитов, преимущественно, протекает по более мягкой матрице и не связано с образованием подповерхностных трещин, а при достижении некоторой критической величины площади контакта матрицы и включений, происходит отрыв фрагментов поверхности, размером, соответствующим размеру включений, рисунок 1б.

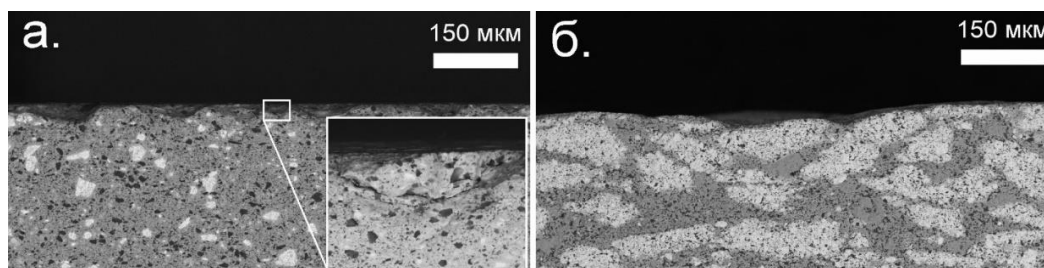


Рис. 1. Снимки поперечного сечения композитов после абразивного изнашивания: а – композит с гомогенным распределением компонентов; б – двойной композит

Таким образом, выявлено, что абразивное изнашивание двойных композитов протекает по схеме сухой «эрозии» и не сопровождается образованием подповерхностных трещин, что обусловлено организацией диссипативной структуры, ингибирующей рост и развитие трещин в композитах, что обеспечивает большую стойкость к абразивному изнашиванию.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0009.

## Литература

1. A. K. Mukhopadhyay, M. Yiu-Wing. *Wear*, 1993, № 162, 258 – 268.
2. A. Buyakov, V. Shmakov., S. Buyakova. *Ceramics International*, 2023, № 9, 13648 – 13656.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТЕЧЕНИЯ РАЗРЯЖЕНИЯ ТИПА ДВОЙНОЙ ВОЛНЫ ПРИ РАЗЛЕТЕ ГАЗА В ВАКУУМ НА КОСОЙ СТЕНКЕ В НЕСОГЛАСОВАННОМ СЛУЧАЕ

Понькин Е. И. <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 8, ул. Комсомольская, г. Снежинск Челябинской области, 456776, Россия, [epnk@rambler.ru](mailto:epnk@rambler.ru)

В работе [1] построено автомодельное решение начально-краевой задачи, описывающее истечение политропного газа в вакуум на косоугольной стенке в несогласованном случае ( $\text{tg}^2 \alpha \text{No}(g + 1) / (3 - g)$ ). Для значения политропы газа  $\gamma = 5/3$  (водород) и угла наклона косоугольной стенки  $\alpha = \pi/3$  построены конкретные выражения для коэффициентов  $c_1(\xi)$ ,  $u_1(\xi)$  и  $v_1(\xi)$  функций  $c(\xi, \vartheta)$ ,  $u(\xi, \vartheta)$  и  $v(\xi, \vartheta)$  – скорости звука и компонент вектора скорости в двойной волне (ДВ), где  $\xi = x/t$ ,  $\vartheta = y/t - f(\xi)$ ,  $f(\xi)$  – известная функция, задающая звуковую характеристику, отделяющую течение типа ДВ от плоского течения.

С целью получения свойств течения типа ДВ в области разряжения рассматривается квазисогласованный случай, когда

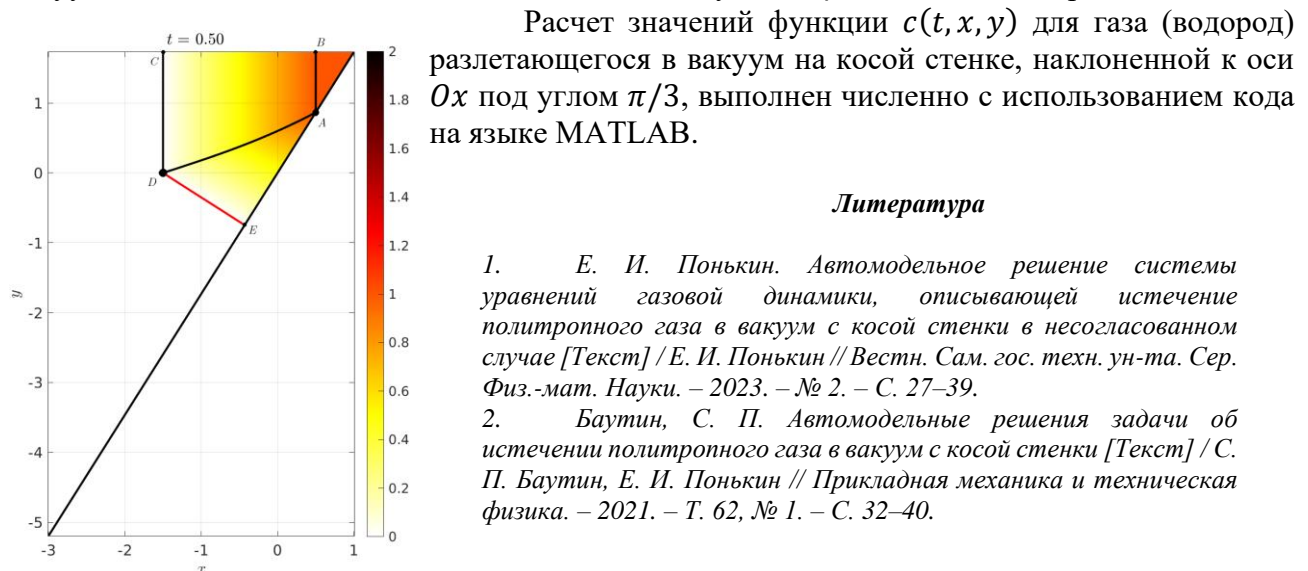
$$c(\xi, \vartheta) = c_0(\xi) + c_1(\xi)\vartheta, \quad (1)$$

при этом  $\text{tg}^2 \alpha \text{No}(g + 1) / (3 - g)$ . Из уравнения  $c = 0$  с учетом выражения (1) можно найти границу газа с вакуумом в окрестности точки  $D$  (см. рис. 1)

$$\eta \approx c_0(\xi)\sqrt{\beta} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right), \quad (2)$$

где  $\beta = (\gamma + 1)/(3 - \gamma)$ ,  $\kappa = (\gamma - 1)/2$ ,  $\eta = y/t$ . Выражение (2) совпадает с уравнением границы газа с вакуумом в согласованном случае, которая есть прямая  $DE$ , перпендикулярная косоугольной стенке  $AE$  (см. работу [2]).

На рис. 1 приведено распределение функции  $c(t, x, y)$  при разлете газа (водорода) в вакуум на косоугольной стенке, наклоненной к оси  $Ox$  под углом  $\pi/3$ , для момента времени  $t = 0.5$ .



Расчет значений функции  $c(t, x, y)$  для газа (водород) разлетающегося в вакуум на косоугольной стенке, наклоненной к оси  $Ox$  под углом  $\pi/3$ , выполнен численно с использованием кода на языке MATLAB.

## Литература

1. Е. И. Понькин. Автомодельное решение системы уравнений газовой динамики, описывающей истечение политропного газа в вакуум с косоугольной стенки в несогласованном случае [Текст] / Е. И. Понькин // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки.* – 2023. – № 2. – С. 27–39.
2. Баутин, С. П. Автомодельные решения задачи об истечении политропного газа в вакуум с косоугольной стенки [Текст] / С. П. Баутин, Е. И. Понькин // *Прикладная механика и техническая физика.* – 2021. – Т. 62, № 1. – С. 32–40.

Рис. 1. Распределение скорости звука в газе в момент времени  $t = 0.5$

# КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ В ОЧАГЕ ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Баранникова С. А., Колосов С. В., Исхакова П. В.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2/4, просп. Академический,  
г. Томск, 634055, Россия, [bsa@ispms.ru](mailto:bsa@ispms.ru), [svk@ispms.ru](mailto:svk@ispms.ru), [iskhakova@ispms.ru](mailto:iskhakova@ispms.ru)

Настоящая работа посвящена изучению локализации пластического течения медно-никелевого сплава МНМц-40-1,5 [1]. Образцы для механических испытаний в форме двусторонней лопатки с рабочей частью  $40 \times 10 \times 2$  мм подвергались одноосному растяжению со скоростью  $5,56 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  одновременно с регистрацией и анализом картин локализованной пластичности методом двухэкспозиционной спекл-фотографии, позволяющим восстанавливать поле векторов смещения и вычислять компоненты тензора пластической дисторсии [2]. Применение логарифмического приема [3] позволило выявить многостадийность деформационного процесса Cu-Ni сплава.

Регистрация и анализ полей смещений в исследуемом сплаве показали, что зоны макроскопической локализации отчетливо выявляются при рассмотрении распределений полутоновой картины интегральных локальных удлинений (рис. 1) с возможностью оценки величины накопленной локализованной деформации в различных координатах образца  $X$  в каждый момент времени  $t$ .

На рисунке 2 для интервала общих деформаций от 30 до 47% представлены зависимости коэффициента деформационного упрочнения  $\theta$  (кривая 1) и интегральных деформаций вдоль средней линии образца для координат  $X = 25 \pm 0,75$  мм (кривая 2), и  $X = 38 \pm 0,75$  мм (кривая 3). На стадии параболического деформационного упрочнения ( $n=0,5$ ) различие между накопленной максимальной (кривая 2) и минимальной (кривая 3) локальной деформацией оказывается невелико, в то время как на стадии предразрушения ( $n < 0,5$ ) данное различие становится существенным при  $\epsilon > 42,5\%$ , что соответствует пределу прочности ( $\theta = 0$  МПа).

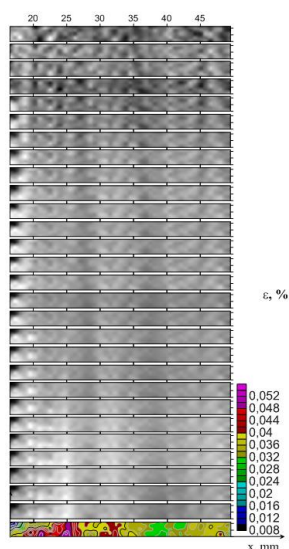


Рис. 1. Распределение накопленной деформации по образцу Cu-40%Ni-1,5%Mn в интервале деформаций от 30 до 47%

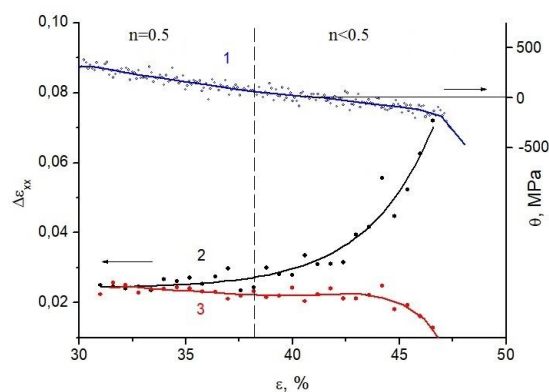


Рис. 2. Зависимости коэффициента деформационного упрочнения от общей деформации (кривая 1); максимального (кривая 2) и минимального (кривая 3), накопления локальных удлинений в очагах деформации

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0011.

## Литература

1. Л.П. Смирягин, Н.Л. Смирягина, А.В. Белов. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Металлургия, 1970.
2. L.V. Zuev, S.A. Barannikova, Crystals 2019, 9(9):458, p. 1–30.
3. В.И. Трефилов, В.Ф. Мусеев, Э.П. Печковский, Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / Под ред. акад. В.И. Трефилова. Киев: Наукова думка. 1987.

# ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ

Пухова Е. А.<sup>1</sup>, Батыров Б. Б.<sup>1</sup>, Бушуева Е. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия  
E-mail: [pukliza@yandex.ru](mailto:pukliza@yandex.ru)

Формирование модифицированных слоев на поверхности стальной заготовки способствует повешению комплекса свойств: твердости, износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости. Уровень этих свойств зависит от сочетания компонентов в порошковой смеси. Одним из перспективных методов для модифицирования поверхностных слоев является вневакуумная электронно-лучевая наплавка (ВЭЛН) порошковых смесей. Толщина полученного слоя составляет до 3 мм. Слои характеризуются отсутствием трещин, пор и расслоений [1]. Для модифицирования поверхности используется порошковая смесь хрома и аморфного бора. Согласно литературным данным [2] сочетание этих элементов приводит к формированию износостойких соединений – боридов.

В данной работе рассматривалась возможность применения механической активации для сокращения потерь порошковой смеси в процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки.

Соотношение компонентов в порошковой смеси составляло 30 масс.% Cr – 70 масс.% В. Время механической активации – 30 секунд, 2 минуты, 5 минут, 10 минут. Режим ВЭЛН: ток пучка – 23 мА, удельная поверхностная энергия – 6,4 кДж/см<sup>2</sup>. Материал основы – хромоникелевая аустенитная сталь 12Х18Н9Т.

На рис.1 представлены структуры модифицированных слоев сформированных после различного времени предварительной механической активации.



Рис.1. Микроструктура сформированных модифицированных слоев: а – 30 секунд; б – 2 минуты; в – 5 минут; г – 10 минут

Установлено, что при механической активации в течении 30 секунд и 2-х минут в модифицированных слоях формируются бориды вытянутой формы, повышающие микротвердость до 420 и 520 HV<sub>0.1</sub> соответственно (микротвердость стали 12Х18Н9Т – 200 HV<sub>0.1</sub>). При дальнейшем повышении времени механической активации формирование боридов не наблюдается.

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России (проект FSUN-2023-0009).*

*Исследования выполнены на оборудовании ЦКП "Структура, механические и физические свойства материалов" (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034, 075-15-2021-698).*

## Литература

1. Голубенко Ю.И. Ускорители электронов серии ЭЛВ: состояние, применение, развитие. /Ю.И. Голубенко, М.Э. Вэйс, Н.К. и др. // Вестник радтех – евразия. 1999 год. № 1 (9). С.6 – 31.
2. Гальченко Н. К. Структура и триботехнические свойства боридных покрытий, полученных электронно – лучевой наплавкой / Н. К. Гальченко, С. И. Белюк, К. А. Колесникова, В. Е. Панин, О. К. Лопакова // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. Спец. Выпуск. С. 133 – 136.



## АКУСТОПОВРЕЖДЕННОСТЬ ПРИ НАКОПЛЕНИИ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ

Полянский В. А., Беляев А. К., Яковлев Ю. А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем машиноведения Российской академии наук, 61, Большой пр.  
Василевского острова, Санкт-Петербург, 199178, Россия, pva@ipme.ru*

Накопление водорода в металлах почти всегда приводит к деградации механических свойств металла. Результатом такой деградации становится индуцированное водородом разрушение под нагрузкой. Возможно три основных механизма поступления водорода: из металлургических материалов при производстве (металлургический водород), из агрессивной внешней среды за счет коррозионных и стресс-коррозионных процессов, из водяного пара, содержащегося в воздухе за счет образования микро и нанотрещин при деформациях поверхности.

Металлургический водород может принципиально отличаться по воздействию на металлы тем, что далеко не всегда быстро диффундирует к поверхности металла в процессе термообработки, прокатки, поковки это приводит к появлению поврежденности типа микро и нанопор и микротрещин, не выходящих на поверхность металла. Такие поврежденности чрезвычайно тяжело диагностировать, так как поры могут иметь характерный размер менее микрометра. Акустические волны от них не отражаются. Быстрые методы измерения концентрации водорода, например, спектральный или метод нагрева в потоке газа носителя тоже не всегда позволяют их выявить. Такие же проблемы встречаются при накоплении водорода из агрессивной внешней среды. Наличие поврежденности выявляется только после аварийного разрушения деталей конструкции.

Комплексное использование двух подходов: вакуумных методов измерения концентрации и метода акустоповрежденности позволяют исследовать и диагностировать индуцированное водородом разрушение на этапе накопления поврежденности любого типа.

Главным преимуществом метода горячей вакуум-экстракции водорода является возможность полного извлечения водорода с контролем потока водорода вплоть до фонового в вакуумной системе.

Метод акустоповрежденности позволяет идентифицировать зоны накопления поврежденности, каждый элемент которой (нанопора или трещина) может быть значительно меньше, чем длинна ультразвуковой волны.

Проведенные нами исследования показывают, что при контакте металла с агрессивной внешней поврежденность накапливается в тонком поверхностном слое (водородный скин-эффект), что хорошо заметно по изменению задержек поперечных ультразвуковых волн, несмотря на то, что толщина слоя составляет около 50 мкм. Весь скин-слой насыщен водородом и является источником развития хрупких трещин.

При пластической деформации и циклическом нагружении (малоцикловая усталость) металлических деталей также образуется насыщенный водородом слой металла толщиной около 100 мкм, что полностью подтверждает теорию Ю.А. Хрусталва о наводороживании металлов при разрушении.

С практической точки зрения важно, что металлургическая поврежденность также доступна для детектирования методом вакуум нагрева. Особая острота проблемы связана с тем, что при производстве сталей сейчас используется значительная доля вторичного металла. В этом случае, водород из внутренних коллекторов не удаляется даже во время вакуумной плавки.

В докладе описаны результаты по контролю внутренней поврежденности методом акусто-поврежденности и водородной диагностики. Данные, полученные на модельных образцах, говорят о полном соответствии зон накопления механической поврежденности и зон накопления растворенного водорода. Измерения распределения водорода, полученные на образцах, после сотен тысяч часов эксплуатации, говорят о том, что влияние водорода на накопление поврежденности и разрушение металлов оказывается очень сильным

## **ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Радченко В. П., Саушкин М. Н.

*Самарский государственный технический университет,  
244, ул. Молодогвардейская, Самара, 443100, Россия,  
radchenko.vp@samgtu.ru, saushkin.mn@samgtu.ru*

Один из методов повышения показателей надежности деталей и элементов конструкций связан с технологиями и методами поверхностного упрочнения, которые вызывают в тонком приповерхностном слое локальные остаточные напряжения (ОН) сжатия, препятствующие выходу на поверхность разного рода вакансий. Положительное влияние ОН отмечено в ряде теоретических и экспериментальных работ, в частности повышается микротвердость и предел выносливости при много- и малоцикловом нагружении, улучшаются трибологические характеристики и другие показатели.

Решение краевых задач, связанных с оценкой кинетики ОН в процессе ползучести, состоит из двух этапов. На первом этапе необходимо решить задачу реконструкции (формирования) полей ОН и пластических деформаций (ПД) после процедуры поверхностного упрочнения. В настоящей работе авторы используют хорошо зарекомендовавший себя феноменологический метод, базирующийся на экспериментально определенной величине распределения по глубине упрочненного слоя одной компоненты тензора ОН: для сплошных цилиндрических образцов в цилиндрической системе координат — это окружная компонента, для призматических образцов в декартовой системе координат, где плоскость  $xOz$  совмещена с упрочненной гранью, — это одна из компонент  $\sigma_x$  или  $\sigma_y$ . Многочисленные попытки прямого моделирования упрочнения поверхности на основе численного решения контактных динамических или квазистатических задач с использованием метода конечных элементов позволяют в большинстве случаев получить распределение ОН лишь на качественном уровне, поскольку учесть все параметры технологического процесса ППД очень сложно, а зачастую и не возможно.

На втором этапе решается краевая задача о релаксации ОН в условиях ползучести с начальным напряженно-деформированным состоянием в поле внешних нагрузок.

Исследуются как гладкие поверхностно упрочненные призматические и цилиндрические детали, так и с надрезами различного геометрического профиля (полукруглый, V-образный, трещиноподобный и другие). Моделируются различные технологии упрочнения (обработка дробью, обкатка роликом, ультразвуковое упрочнение, алмазное выглаживание).

Приводится большой фактический расчетный и экспериментальный материал для полей ОН в деталях из сплавов ЖС6КП, ЭИ698, ЭП742, Д16Т после упрочнения и в процессе высокотемпературной ползучести в различные временные сечения для различных комбинированных приложенных внешних нагрузок.

Выполнена обстоятельная экспериментальная проверка предложенных расчетных методик. Анализируются возможности применения полученных теоретических и экспериментальных результатов для оценки ресурса упрочненных деталей в энергомашиностроении.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-29-00434.*

## ИЗЛОМ ТРАЕКТОРИИ И ВЕТВЛЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ПРИ СМЕШАННОМ НАГРУЖЕНИИ

Кургузов В. Д.

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 15, пр-т Лаврентьева,  
Новосибирск, 630090, Россия, kurguzov@hydro.nsc.ru*

Проведено исследование излома и ветвления прямолинейной плоской трещины в структурно-неоднородном (зернистом) материале при совместном действии нагрузок, соответствующих I и II модам разрушения. Рассмотрен случай пропорционального нагружения, т.е. когда компоненты напряжений возрастают пропорционально некоторому параметру. Прочностные свойства материала характеризуются кривой предельного состояния (прочности) типа Кулона-Мора (оггибающая Мора) на плоскости  $\sigma - \tau$ , где  $\sigma$  и  $\tau$  – нормальные и касательные напряжения на некоторой площадке. Зависимость  $\tau = \tau(\sigma)$  является нелинейной, определяется экспериментально и охватывает весь диапазон разрушения от хрупкого и квазихрупкого ( $\sigma > 0$ ) до разрушения в пластической области ( $\sigma < 0$ ). Введена классификация материалов по типам поведения при разрушении: хрупкие, квазихрупкие, квазивязкие и вязкие материалы. Классификация связана с углом, задающим путь пропорционального нагружения и характеризующим напряженное состояние на плоскости предельного состояния. При пропорциональном нагружении в окрестности вершины трещины возникает сложное напряженное состояние. Характер дальнейшего движения трещины (прямолинейное, излом траектории или ветвление) существенно зависит от вида кривой прочности на плоскости  $\sigma - \tau$ : для материалов, склонных к отколу (хрупкий и квазихрупкий материалы), имеем  $\tau_t \approx \sigma_t$ ; для материалов, слабо сопротивляющихся испусканию дислокаций (вязкий и квазивязкий материалы), имеем  $\tau_t \ll \sigma_t$ , где  $\sigma_t, \tau_t$  – пределы прочности (текучести) материала на растяжение и сдвиг.

С использованием силового (интегрального) критерия Нейбера – Новожилова получены соотношения, позволяющие определить углы излома (ветвления) траектории трещины при произвольном обобщенном напряженном состоянии. В асимптотических представлениях компонент напряжений в окрестности вершины трещины учитываются несингулярные слагаемые ( $T$ -напряжения). Установлено, что трещина развивается: 1) перпендикулярно направлению максимального растяжения при отсутствии сдвигающих напряжений в окрестности ее вершины, когда материал разрушается хрупко; 2) вдоль направления максимального сдвига при отсутствии нормальных напряжений в окрестности ее вершины, в случае вязкого разрушения (имеет место испускание дислокации); 3) вдоль некоторого направления, соответствующего смешанному напряженному состоянию (квазихрупкое или квазивязкое разрушение). Различия траекторий распространения трещин существенно зависят от вида кривой теоретической прочности на плоскости предельных состояний. Анализ экстремумов характеристической функции позволяет определить углы излома (ветвления) трещины на физической плоскости. Возможны следующие варианты продвижения трещины: а) трещина распространяется прямолинейно; б) излом траектории трещины; в) однократное симметричное ветвление трещины; г) многократное симметричное ветвление трещины. С ростом  $T$ -напряжений углы излома трещины возрастают. При достаточно больших положительных  $T$ -напряжениях возможно ветвление первоначально прямолинейной трещины нормального отрыва. В изотропном линейно упругом материале, кривая предельного состояния которого близка к окружности, трещина поперечного сдвига искривляется под углом  $70,5^\circ$ . Однако для материалов с малым отношением пределов прочности на сдвиг и на растяжение наблюдается прямолинейное распространение трещины поперечного сдвига даже при нулевых  $T$ -напряжениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-19-00514).

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАКОВУЮ ОПУХОЛЬ В КОСТНОЙ ТКАНИ

Еремина Г. М.<sup>1</sup>, Смолин А. Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИФПМ СО РАН, 2/4, просп. Академический, г. Томск, 634055, Россия, ankeeva@ispms.ru

<sup>2</sup>ИФПМ СО РАН, 2/4, просп. Академический, г. Томск, 634055, Россия, asmolin@ispms.ru

Остеосаркома считается одним из видов рака наиболее способным к активному развитию вторичных опухолевых процессов. Недавние исследования показали, что к росту и миграции раковых клеток приводит относительно небольшие величины сжимающего напряжения более 40 кПа, а большая амплитуда может привести к остановке роста опухоли. В то же время большие величины внешнего механического воздействия могут приводить к деградации костных тканей. Поэтому актуальным является исследование влияния уровня механической стимуляции (УВТ) на поражённые неопластическими процессами костные ткани с целью регенерации тканей скелета и деактивизации раковых областей [1]. В связи с вышесказанным целью данной работы является разработка численной модели механического поведения остеосаркомы при ударно-волновом нагружении.

В данной работе была разработана мезомодель раковой опухоли сферической формы, помещенной в костном матриксе кубической формы с размерами 5\*5\*5 мм. Опухоли были присвоены следующие свойства плотность  $\rho=800$  кг/м<sup>3</sup>, модуль сдвига  $G=2,03$  кПа, модуль объёмного сжатия  $K=101$ кПа, пористость  $\Theta=20\%$ , проницаемость  $k= 2,14 \times 10^{-17}$  м<sup>2</sup> [2]. Окружающим тканям опухоль были присвоены свойства губчатой ткани: пороупругие характеристики раковой ткани: плотность  $\rho=800$  кг/м<sup>3</sup>, модуль сдвига  $G=80$  МПа, модуль объёмного сжатия  $K=100$  МПа, пористость  $\Theta=70\%$ , проницаемость  $k= 1 \times 10^{-16}$  м<sup>2</sup> [3]. Медный аппликатор располагался непосредственной близости к поражённому участку сверху модельного образца. Для описания механического поведения меди использовалась упругая модель с параметрами  $\rho=8950$  кг/м<sup>3</sup>, модуль сдвига  $G=41,6$  ГПа, модуль объёмного сжатия  $K=115$  ГПа. Исследовалось влияние УВ в диапазоне от 0.02 до 0.2 мДж/мм<sup>2</sup>.

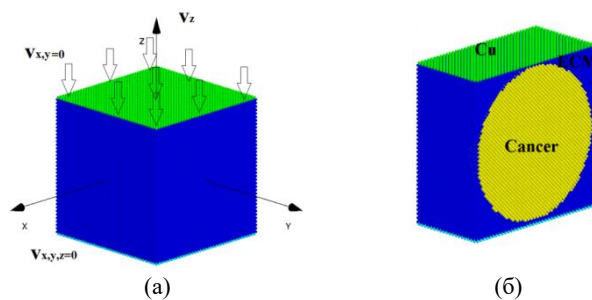


Рис. 1. Ударно-волновое нагружение участка костного матрикса с раковой опухолью: мезомодель раковой опухоли в матриксе с условиями нагружения (а), мезомодель раковой опухоли срез (б)

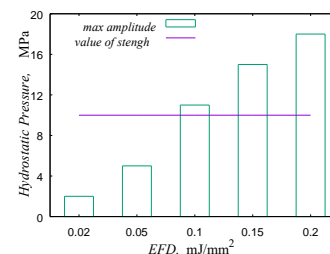


Рис. 2. Гистограмма зависимости максимальной амплитуды гидростатического давления от величины УВВ

На основе анализа полей распределения параметра гидростатического давления с учетом критерия апатоза (40кПа) было установлено, что при малоинтенсивном УВ воздействии 0.02 мДж/мм<sup>2</sup> и 0.05 мДж/мм<sup>2</sup> в раковой опухоли условия для апатоза наблюдается в объеме 0.9 и 1.2% соответственно, в окружающем костном матриксе 2 и 3% соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 23-79-01107.

## Литература

1. S.W. Verbruggen, J. Nolan, M.P. Duffy, O.M.T. Pearce, C.R. Jacobs, M.M. Knight, 2024. Adv. Scie. 11(2), e2305842.
2. D. Su, R. Ma, L. Zhu. Med Biol Eng Comput. 2011, 49(11),1233-1240.
3. R.X. Fan, J. Liu, Y.L. Li, J. Liu, J.Z. Gao. Biomed Res Int. 2018, 2018,7962414.

# ВЛИЯНИЕ ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ НА СКРУЧИВАНИЕ СТЕРЖНЯ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА ПРИ ЕГО СЖАТИИ

Ахметшин Л. Р.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, 2/4,  
пр. Академический, г. Томск, Российская Федерация, akhmetshin.lr@gmail.com

Метаматериалы – искусственно созданные структурированные материалы, свойства которых обусловлены не химическим составом базового материала, а искусственно заданной структурой, которая строится из элементарных ячеек [1]. Отдельный класс метаматериалов – механические метаматериалы [2]. В данной работе с использованием программного комплекса Ansys WB методом конечных элементов были проведены расчеты одноосного сжатия стержневого образца (рис. 1а, б) из тетрахирального метаматериала (рис. 1д, е). Для описания поведения базового материала (каркаса) использовалась система уравнений теории упругости. При одноосном нагружении образец механического метаматериала, благодаря своей тетрахиральной структуре, скручивается вдоль оси  $Y$  приложения силы. При этом узловые точки грани образца в плоскости  $XZ$  отклоняются на величину  $x = z$ . Из геометрических соображений, угол вращения определяется выражением:  $\sin \alpha = 2x/d$ .

В данной работе рассматривается метод соединения ячеек «внахлест», который отличается от метода «присоединение» (рис. 1в, г) [1]. Ранее в работе [3] были определены зависимости  $\alpha$  и эффективного модуля Юнга  $E$  от изменения параметров элементарной ячейки  $t$ ,  $h$ ,  $\theta$ ,  $r_1$  и  $r_2$  (рис. 1е). Здесь считается, что площадь поперечного сечения  $S$  связок и колец одинакова и определяется по формуле:  $S = t \cdot h = h \cdot (r_2 - r_1)$ . В этом случае все параметры, кроме  $r_2$ , становятся зависимыми. Поэтому мы можем принять  $r_2$  и  $S$  в качестве двух параметров, определяющих структуру элементарной ячейки метаматериала. В общем случае ищем зависимость угла поворота в виде  $\alpha(r_2, S)$  (рис. 1з). Величина  $r_2$  варьировалась от максимального до минимального уровня (рис. 1ж).

Получены результаты для различных площадей поперечного сечения элементов структуры метаматериала (связок и колец), которые варьировались от 1 до 25 мм<sup>2</sup>. Видно, что поведение кривых, одинаково для разных площадей поперечного сечения.

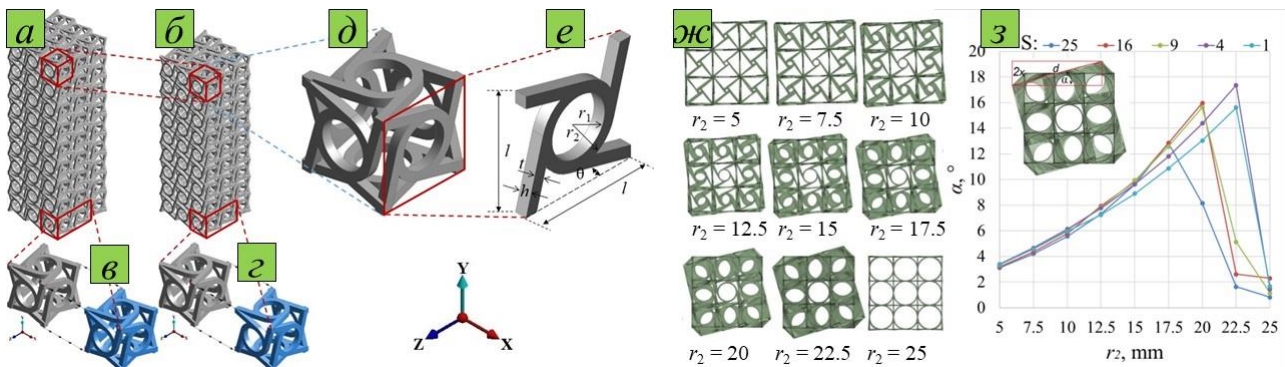


Рис. 1. Описание структуры метаматериала (а–е) и зависимость угла закручивания от радиуса внешнего кольца для различных площадей поперечного сечения элементов конструкции метаматериала (ж–з)

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН тема номер FWRW-2022-0003.

## Литература

1. Л.Р. Ахметшин, И.Ю. Смолин. Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 77. 27-37
2. A. Sangsefidi, J. Kadkhodapour, A.P. Anaraki, S. Dibajian, S. Schmauder. Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25, № 4. 106–121
3. L. R. Akhmetshin, I. Yu. Smolin, Nanoscience and Technology: An International Journal. 2020. Vol. 11, Iss. 3. 265–273

# СКРУЧИВАНИЕ ЯЧЕЙКИ МЕТАМАТЕРИАЛА С ТОПОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ

Ахметшин Л. Р., Казанцева Е. А., Иохим К. В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634055, 36,  
пр. Ленина, г. Томск, Российская Федерация, [akhmetshin.lr@gmail.com](mailto:akhmetshin.lr@gmail.com),  
[kazantseva.ea@ispms.ru](mailto:kazantseva.ea@ispms.ru), [iokhim.k@mail.ru](mailto:iokhim.k@mail.ru)

Метаматериалы – материалы, свойства которых обусловлены не химическим составом базового материала, а искусственно заданной формы, подобные конструкции строятся из блоков или элементарных ячеек [1]. Отдельный класс метаматериалов – механические метаматериалы [2]. В данной работе с использованием программного комплекса Ansys WB методом конечных элементов были проведены расчеты одноосного нагружения элементарной ячейки тетрахирального метаматериала с различными топологическими преобразованиями. Для описания поведения базового материала (каркаса) использовалась система уравнений теории упругости. Хиральная структура имеет отличительное свойство, позволяющее скручиваться образцу из метаматериала при одноосном силовом нагружении.

Исходная ячейка имела регулярное расположение структур, любое искусственное преобразование обозначим как топологический дефект. Рассмотрим случай одноосного нагружения вдоль оси  $Y$  (рис. 1). Вершины кубической ячейки отклоняются от исходного положения на 1,51 мм (перпендикулярно оси нагружения – плоскость  $XZ$ ). Изменение направление вращения одной верхней грани приводит к симметричному увеличению (по модулю) значений отклонений в плоскости  $XZ$ . Изменение направления вращения нижней грани еще больше увеличивает скручивание – 2.05 мм. Дальнейшие преобразования приводят к снижению исследуемого эффекта. Изменение направления вращения всех граней привело к тому, что ячейка обрела регулярное расположение структур, но направление скручивания в этом случае происходит в обратную сторону.

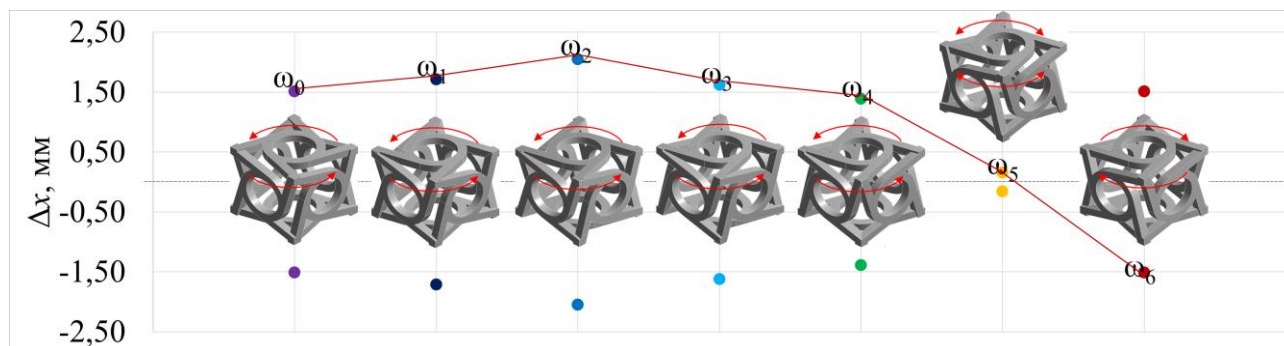


Рис. 1. Отклонения вершин верхней грани при топологических преобразованиях элементарной ячейки

Топологические преобразования приводят к изменению в механическом поведении не только вдоль одной оси нагружения, но и в других [3]. Подобный эффект связан не только с коллективным скручиванием тетрахиральных структур, но и от формоизменения связок и кольца [4].

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета («Приоритет-2030»).

## Литература

1. Л.Р. Ахметшин, И.Ю. Смолин. Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 77. 27-37
2. A. Sangsefidi, J. Kadkhodapour, A.P. Anaraki, S. Dibajian, S. Schmauder. Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25, № 4. 106–121
3. L.R. Akhmetshin, K.V. Iokhim, E.A. Kazantseva, I.Yu. Smolin. Designs. 2023. V. 7. № 6. 129
4. Л.Р. Ахметшин, К.В. Иохим, Е.А. Казанцева, И.Ю. Смолин. Известия вузов. Физика. 2024. № 3. 90-99.

# ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ. ТОЧЕЧНЫЙ НАГРЕВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ахметханов Р. С.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
4, М. Харитоньевский пер., Москва, 101990, Россия, mibsts@mail.ru*

Цель данной работы – разработка процедур обработки термограмм при точном нагреве композиционного материала с целью выявления дефектов.

Точечный метод нагрева относится к тепловому активному контролю. При этом используется лазерный нагрев в точке контроля. При однородных свойствах композиционного материала тепловое поле представляет собой температурную поверхность в виде «колокола». Любые искажения температурного поля показывают на неоднородность материала или наличие дефектов.

В работе для оценки особенности тепловых полей использовались статистические данные, мультифрактальные спектры, связность Минковского и распределение размеров зон с одинаковы уровнем деформации.

На рисунке 1. приведены термограммы при точечном контроле в зоне без дефекта (а,б) и дефекта (в,г). В случае дефекта температура в зоне нагрева выше. Визуально видно, что тепловые пятна не симметричны. Несимметричность теплового пятна обусловлено неоднородностью материала и, как следствие неоднородности теплопроводности материала в разных направлениях.

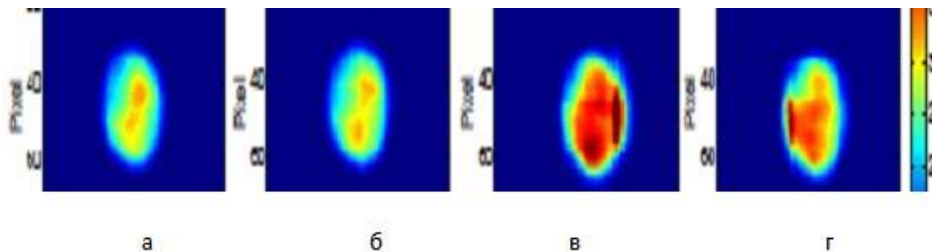


Рис. 1. Термограммы нагрева материала (а и б) в бездефектном материале и (в, г) дефектном материале

Рассмотрим статистические данные, которые приведенные в таблице 1. Они представлены в относительных единицах – градации серого (изображение термограммы в градации серого цвета, от черного к белому).

Таблица 1 - Таблица статистических данных термограмм при локальном нагреве

Термограммы	Сред. квадр. зерен	Асимметрия	Эксцесс	Высота пика	Коэффициент вариации, %
Без дефекта	0,268225	1,14735	-0,287677	0,649339	50,48
При наличии дефекта	0,186305	0,444805	-1,65663	0,74793	55,034

Выявлены количественные отличия в пределах от 10 % (коэффициент вариации) и до 475 % (эксцесс) в случае теплового воздействия по приведенным термограммам для случаев без дефекта и наличия дефекта. Наиболее информативным критерием являются высота пика (температуры), эксцесс и коэффициент вариации.

Эксперименты показали, что при наличии дефекта мультифрактальный спектр из монофрактального превращается в мультифрактальный спектр. Структура теплового поля (деформации) становится более сложной.

Работа выполнена при финансировании по гранту РФФИ №20-19-00769-П.

# ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ. УДАРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ахметханов Р. С.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
4, М.Харитоньевский пер., Москва, 101990, Россия, mibsts@mail.ru*

Цель работы – разработка процедур анализа термограмм при ударном контроле с целью выявления дефектов в композиционном материале.

Разница температур между дефектом и основным материалом необходима для обнаружения сингулярности в тепловом поле. Выделяющаяся энергия при ударе вызывает локальное повышение температуры и отображается камерой как горячая точка. При ударе возникают местные локальные напряжения. От уровня созданного напряжения зависит уровень повышения (или понижения) температуры. Метод ударного импульса имеет высокую популярность среди методов неразрушающего контроля.

Для оценки особенности тепловых полей использовались статистические данные, мультифрактальные спектры, связность Минковского и распределение размеров зон с одинаковы уровнем деформации. Мультифрактальные спектры связаны с видом этих распределений.

Рассмотрим термограмму после нанесения удара на пластину из композиционного материала. Локализованные воздействия удара в виде теплового поля можно увидеть на рисунке 1. Белая точка место нанесения удара.

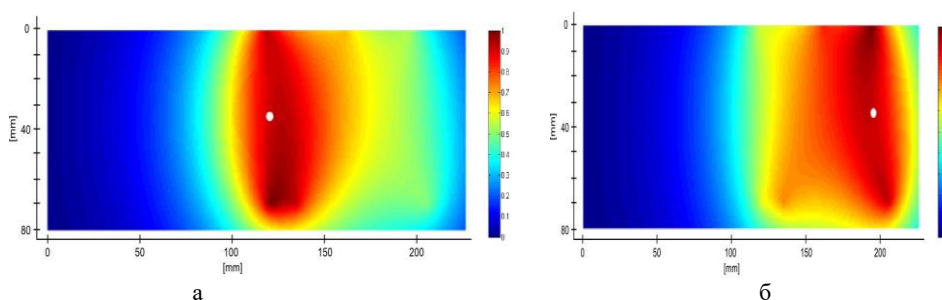


Рис. 1. Термограммы теплового поля при ударах: а – материала без дефекта; б – материал с дефектом

На рисунке 1а представлен вариант удара без возникновения дефекта. На рис. 1б есть дефект расслоения. Тепловое поле не симметрично относительно точки удара.

При наличии дефекта мультифрактальный спектр из монофрактального превращается в мультифрактальный спектр. В таблице приведены статистические данные.

Таблица 1 - Таблица статистических данных

Термограммы	Сред.кв.др. зерен	Асимметрия	Эксцесс	Высота пика	Коэффициент вариации, %
Рис. 1а	0,11115	-1,76655	1,77545	0,062893	34,29
Рис. 1б	0,958160	-2,30518	5,32403	0,041840	30,79

Выявлены количественные отличия в пределах от 10%(коэффициент вариации) и до 355% (эксцесс) в случае ударного воздействия по приведенным термограммам для случаев без дефекта и наличия дефекта. Наиболее информативным критерием являются высота пика (температуры), эксцесс и коэффициент вариации.

Работа выполнена при финансировании по гранту РФФИ №20-19-00769-П.



# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА МОРФОЛОГИЮ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ ХРОМ-БОР

Батыров Б. Б.<sup>1</sup>, Пухова Е. А.<sup>1</sup>, Бушуева Е. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия. E-mail, [pukliza@yandex.ru](mailto:pukliza@yandex.ru)

Хромоникелевая аустенитная сталь 12Х18Н9Т широко используется в современной промышленности благодаря комплексу свойств – устойчивость к высоким и низким температурам (от +600 до -196 °С), коррозионной стойкости, пластичности. Но также существует ряд недостатков – низкое значение твердости и износостойкости. В данной работе осуществлялось борирование поверхности стальной заготовки методом вневакуумной электронно-лучевой обработки (ВЭЛО), что по литературным данным способствует повышению микротвердости поверхности [1 – 3].

Для борирования использовалась порошковая смесь хрома и бора в соотношении компонентов 50 масс.% В – 50 масс.% Сг. В следствие большого различия размера частиц порошка бора ( $\approx 10$  мкм) и хрома ( $\approx 100$  мкм) в работе применялась механическая активация различной продолжительности – 30 секунд, 2, 5, 10 минут. Режим ВЭЛО: ток пучка – 23 мА, удельная поверхностная энергия – 6,4 кДж/см<sup>2</sup>. Материал основы – хромоникелевая аустенитная сталь 12Х18Н9Т.

На рисунке 1 представлены порошки до предварительной механической активации (а – б) и после проведения активации (в – е).

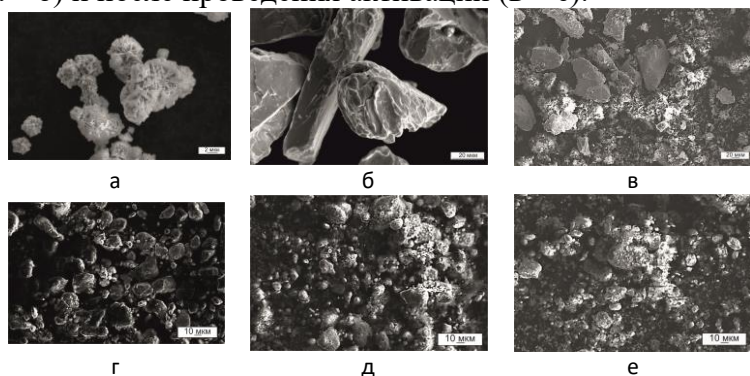


Рис. 1. Порошки до механической активации бора и хрома (а и б) и после механической активации : в – 30 секунд; г – 2 минуты; д – 5 минут; е – 10 минут

Было установлено, что механическая активация способствует уменьшению размера частиц хрома до 20 мкм (время 5 мин.). Частицы приобретают более округлую форму. Увеличение времени активации до десяти минут не приводит к измельчению частиц. Также обнаружено агломерирование частиц порошка бора и хрома.

При формировании модифицированных слоев образование крупных боридов в поверхности не наблюдается, слои кристаллизуются с образованием твердого раствора на основе бора и хрома. Уровень микротвердости поверхности достигает 450 HV<sub>0.1</sub> (микротвердость стали 12Х18Н9Т – 200 HV<sub>0.1</sub>) вне зависимости от времени механической активации

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России (проект FSUN-2023-0009). Исследования выполнены на оборудовании ЦКП "Структура, механические и физические свойства материалов" (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034, 075-15-2021-698).

## Литература

1. Сагарадзе В. В. Упрочнение и свойства аустенитных сталей / В. В. Сагарадзе, А. И. Уваров. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. 720 с. Текст: непосредственный.
2. Голковский М.Г. Закалка и наплавка релятивистским электронным пучком вне вакуума. Технологические возможности метода. / М.Г Голковский. – Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. 317 с.
3. Santana D.A. Wear-resistant boride reinforced steel coatings produced by non-vacuum electron beam cladding / D.A. Santana, G.Y. Koga, W. Wolf, I.A. Bataev, A.A. Ruktuev, C. Bolfarini, C.S. Kiminami, W.J. Botta, A.M. Jorge Jr. // Surface & Coatings Technology. 2020. Vol. 386.

# ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н9Т МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО – ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

Андрюшкина В. Е.<sup>1</sup>, Пухова Е. А.<sup>1</sup>, Бушуева Е. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия. E-mail, [pukliza@yandex.ru](mailto:pukliza@yandex.ru)

Хромоникелевая аустенитная сталь, обладает рядом достоинств и недостатков. К достоинствам относится высокая пластичность, трещиностойкость, коррозионная стойкость и технологичность. К недостаткам можно отнести низкую износостойкость [1]. Изнашивание деталей происходит при воздействии различных частиц (отработанная порода, глина, песок и т.д), что может вызвать заклинивание или поломку всего узла [2 – 3].

Одним из перспективных направлений по повышению износостойкости, стали 12Х18Н9Т является создания модифицированных слоёв методом вневакуумной электронно-лучевой обработки (ВЭЛО). Параметры обработки использовались следующие: энергия электронного пучка – 1,4 МэВ; ток пучка – 23 мА; скорость перемещения образца относительно пучка – 10 мм/с; удельная поверхностная энергия – 6,4 кДж/см<sup>2</sup>.

В качестве порошковой смеси, для упрочнения поверхностных слоёв использовалась смесь бора и хрома в различных концентрациях (таблица 1). Материал основы – сталь 12Х18Н9Т. Хром используется в качестве смачивающего компонента, а бор в качестве модифицирующего. Флюс (MgF<sub>2</sub>) применяется для защиты поверхности от воздействия воздушной атмосферы во время обработки.

Таблица 1 – Соотношение компонентов порошковой смеси

	H5	H10	H20	H202 (нанесение порошковой смеси в 2 слоя)	H30	H40
Cr, масс.%	5	10	20	20	30	40
B, масс.%	10					
MgF <sub>2</sub> , масс.%	85	80	70	70	60	50

Оценка износостойкости проводилась двумя методами:

– в условиях трения о закрепленные частицы абразива [4]. Максимальный уровень износостойкости наблюдается при концентрации хрома 20 масс.% и двуслойном нанесении (в 2,3 раза выше эталона).

– в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц [5] повышение износостойкости в 3,6 раза наблюдается при концентрации хрома 5 масс.%.

Оба метода измерения показали, что износостойкость всех образцов возрастает относительно хромоникелевой аустенитной стали 12Х18Н9Т.

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России (проект FSUN-2023-0009). Исследования выполнены на оборудовании ЦКП "Структура, механические и физические свойства материалов" (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034, 075-15-2021-698).*

## Литература

1. Арзамасов, В. Б. *Материаловедение и технология конструкционных материалов*. 2007. 538 с.
2. Голубенко Ю.И. *Ускорители электронов серии ЭЛВ: состояние, применение, развитие. Вестник радтех – евразия*. 1999 год. № 1 (9). С.6 – 31.
3. *Концептуальные основы создания современных технологий наплавки покрытий. Транспортное машиностроение*. 2022. №6 (6). С. 48 – 61.
4. ГОСТ 17367–71. *Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы*. Москва : Изд-во стандартов, 1972. – 5 с.
5. ГОСТ 23.208–79. *Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные*. Москва: Стандартинформ, 1994. 4 с.

## ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРНОГО ВОДОРОДНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В НЕФТЕХИМИИ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

Нечаева А. В.<sup>1</sup>, Шалагаев В. В.<sup>1,2</sup>, Полянский В. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-диагностический центр «Научно-производственная фирма «Русская лаборатория», д. 9, переулок Пушкинский, г. Санкт-Петербург, 197101, Россия,  
anna.nechaeva@ruslab.org

<sup>2</sup>Институт Проблем Машиноведения РАН, д. 61, Большой проспект,  
Васильевский остров, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия

Длительное время считалось, что при низком давлении водородосодержащей окружающей среды насыщения низколегированных сталей водородом происходит только при температурах выше 580 °С. Технические справочники и авторы исследований ссылаются на диаграмму Нельсона. Эта диаграмма была получена при искусственном насыщении стальных образцов газообразным водородом при различных давлениях и температурах водорода и временах насыщения от 2 до 700 часов. Отдельные точки диаграммы подтверждены также в экспериментальных работах Арчакова Ю.И.

Нами проведено исследование металла стенок нефтехимического реактора из низколегированной стали после его реального разрушения при эксплуатации. В докладе показано как происходит водородная коррозия в оборудовании, работающем под внешней термомеханической нагрузкой при длительной эксплуатации (порядка 100 тыс. ч) и низком давлении водородосодержащей внутренней среды (0,05 МПа).

Наблюдается значительное отличие механических свойств и микроструктуры металла от данных научной литературы, т.е. от образцов, искусственно насыщенных водородом под большим давлением в течение относительно короткого времени при отсутствии внешней механической нагрузки на металлические образцы.

В процессе эксплуатации под воздействием водорода произошло полное обезуглероживание внутренней структуры. Микроструктура образца вблизи места разрушения стенок реактора состоит из практически чистого феррита (растворимость углерода в феррите  $\leq 0,02\%$ ). Одновременно, результаты оптико-эмиссионного спектрального анализа говорят об отсутствии обезуглероживания металла. Измеренная таким образом концентрация углерода составила 0,11%.

Данные энергодисперсионной спектроскопии и анализ качественных реакций позволяет сделать вывод о том, что при изменении микроструктуры во время эксплуатации реактора углерод за счет диффузионного процесса выдавливается из зерен металла и скапливается по их границам.

Зафиксированные отклонения от описанных в литературе закономерностей взаимодействия водорода со сталями требуют дополнительного исследования. Можно предположить, что именно такие процессы идут в промышленности и приводят к авариям и отказам.

Таким образом, показано, что при анализе реальных процессов насыщения водородом, протекающих при низком давлении в водородосодержащей среде во время эксплуатации оборудования, требуется пересмотр общепринятых закономерностей в части влияния водорода и внешней нагрузки на структурные и химические превращения металла.

# КОМПОЗИТЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПУАССОНА: АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ НА СТЕПЕНЬ АУКСЕТИЧНОСТИ

Тарасова А. С.<sup>1</sup>, Ташкинов М. А.<sup>1</sup>, Виндокуров И. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Российская Федерация, a.tarasova@pstu.ru*

Метаматериалы имеют характеристики и особенности, отсутствующие у природных материалов, например, отрицательный коэффициент Пуассона (ауксетики). Термин ауксетик происходит от греческого слова «auxetos» и означает «склонный к расширению». Геометрия ауксетика позволяет структуре поперечно расширяться (сжиматься) при приложении продольного растяжения (сжатия). Ауксетичное поведение может быть достигнуто на нано, микро или макроуровне, поскольку лежащая в основе система деформации является масштабируемой. Одним из способов достижения ауксетичного поведения является формирование решетчатой структуры на основе особого дизайна ячейки периодичности. Так, решетчатые структуры на основе повторно-входящей ячейки имеют большие преимущества, которые показывают множество потенциальных применений в авиации, автомобилестроении, биомедицинских приложениях и других областях. Ауксетичное поведение таких структур сохраняется не зависимо от ориентации ячейки (осевой или поперечной) [1].

В данной работе были исследованы два типа структур, которые были разработаны на основе повторно-входящей элементарной ячейки и образовывали квадрат в плоскости XY. В первую группу вошли пористые образцы, изготовленные с применением аддитивных технологий. Структуры второй группы использовались для исследования влияния второй фазы с помощью численного моделирования. Были созданы конечно-элементные (КЭ) модели двухфазных ауксетичных композитов с различными упругими свойствами наполнителя. Для сравнения результатов КЭ моделирования с экспериментальной оценкой полей деформации использовалась система корреляции цифровых изображений.

Исследовано влияние модуля упругости наполнителя на эффективный коэффициент Пуассона двухфазной ауксетичной композитной структуры. Продемонстрировано, что изменение упругих свойств наполнителя может резко снизить способность структуры сохранять отрицательное значение коэффициента Пуассона. Этот эффект может быть использован для настройки и прогнозирования поведения ауксетичных решетчатых структур, которые предназначены для использования в контакте с окружающей средой, например, в биомедицинских приложениях.

Исследование выполнено в Пермском Национальном Исследовательском Политехническом Университете в рамках Федеральной программы академического лидерства "Приоритет-2030".

## *Литература*

1. *M. Tashkinov, A. Tarasova, I. Vindokurov, and V. V. Silberschmidt, "Composites with Re-Entrant Lattice: Effect of Filler on Auxetic Behaviour," Polymers (Basel), vol. 15, no. 20, 2023, doi: 10.3390/polym15204076.*

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА Cu/TiC + TiB<sub>2</sub> ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Пугачева Н. Б., Быкова Т. М.

*Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, Комсомольская,  
Екатеринбург, 620049, Россия, [nat@imach.uran.ru](mailto:nat@imach.uran.ru), [tatiana\\_8801@mail.ru](mailto:tatiana_8801@mail.ru)*

Композиты, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), успешно конкурируют с другими известными износостойкими материалами, такими как стеллиты и твердые сплавы. Использование медной матрицы в таких композитах позволяет получать наряду с высокой твердостью и износостойкостью повышенные значения тепло- и электропроводности, что весьма важно для таких изделий, как корпуса охладителей элементов ТВЧ установок, электрододержатели дуговых печей, штоки гидроцилиндров контактной машины рельсосварочного мобильного поезда и другие. Разработан способ получения композитов Cu/TiC + TiB<sub>2</sub> в виде сэндвич-пластин, внутри которых формируется сам композит, а снаружи располагается стальная оболочка. Внешний вид пластин и порядок их формирования подробно описан в работе [1]. Эти композиты показали высокую твердость и абразивную износостойкость [2]. Экспериментально установлены температуры и давления, необходимые для получения значимой истинной деформации ( $\epsilon \geq 0,1$ ) композита без его разрушения по результатам испытаний на одноосное сжатие образцов в условиях нагрева [1]. Показано, что деформация композита происходит за счет динамической рекристаллизации медной матрицы.

Пластическая деформация композита была реализована методом горячей прокатки сэндвич-пластин на стане дуо. Прокатку проводили в 4 прохода с обжатием 2 мм в каждом проходе. Перед каждым проходом пластину предварительно нагревали до температуры 850 °С и выдерживали в печи в течение 1 часа. После окончания деформации также проводили отжиг при 850 °С для снятия остаточных напряжений. Суммарная истинная деформация композита составила 0,5. Микроструктуру композита исследовали на сканирующем микроскопе TESCAN с ЭДС приставкой OXFORD и в режиме дифракции отражённых электронов с помощью программного комплекса к приставке Oxford Nklnordlysft+.

Количественное соотношение фаз в композите после прокатки изменилось: доля частиц карбида титана увеличилась от 4 об. % в исходном состоянии до 10 об. %, диборида титана от 3 до 9 об. %, интерметаллида Cu<sub>4</sub>Ti – от 12 до 20 об. %. После множественного прохождения рекристаллизационных процессов зёрна медной матрицы измельчаются до размеров менее 2 мкм. После охлаждения с печью в матрице композита преобладают малоугловые границы, доля деформированных зёрен составила 69 %, субструктуры – 25 %, рекристаллизованных зёрен – 6 %.

Синтез композита и исследования его микроструктуры в исходном состоянии выполнены за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-29-00188, <https://rscf.ru/project/22-29-00188>), а горячая прокатка и исследования изменения структуры проведены по государственному заданию (тема № 124020700063-3).

### *Литература*

1. N. Pugacheva, D. Kryuchkov, T. Bykova, D. Vichuzhanin. *Materials*, 2023, Volume 16, Issue 8, p. 320.
2. Пугачева Н.Б., Николин Ю.В., Быкова Т.М., Сенаева Е.И. *Физика металлов и металловедение*. 2022. Т. 123. № 1. С. 47 – 54.

## ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ ПОЛЕЙ РАЗРУШЕНИЯ

Косов Д. А.<sup>1</sup>, Туманов А. В.<sup>1</sup>, Шлянников В. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ “КазНЦ РАН”, д. 2/31, ул. Лобачевского, г. Казань, 420111, Российская Федерация, [dima45001@gmail.com](mailto:dima45001@gmail.com)

Одной из основных причин разрушения и наступления предельного состояния элементов конструкций является образование и распространении макроскопических трещин вследствие накопления повреждений в материале. Для прогнозирования такого разрушения необходимо использовать соответствующие модельные представления, которые описывают поведение материала. Один из таких подходов - это интенсивно изучаемые и развиваемые модели фазовых полей разрушения.

Фазовые поля позволяют прогнозировать сложные формы разрушения, такие как ветвление трещин, их слияние и образование при произвольных геометриях и размерах материала. В данной работе представлены результаты нескольких задач в двумерной и трехмерной постановках. Объектом численного исследования в первой задаче является пластина с односторонним надрезом. На Рис. 1а представлены фазовые поля разрушения для нормального отрыва. На Рис. 1б и Рис. 1в представлены результаты моделирования ветвления и девиации трещины для задачи начального чистого сдвига. На основе полученных данных дана оценка эффектов нелинейного деформирования на поведение фазовых полей.

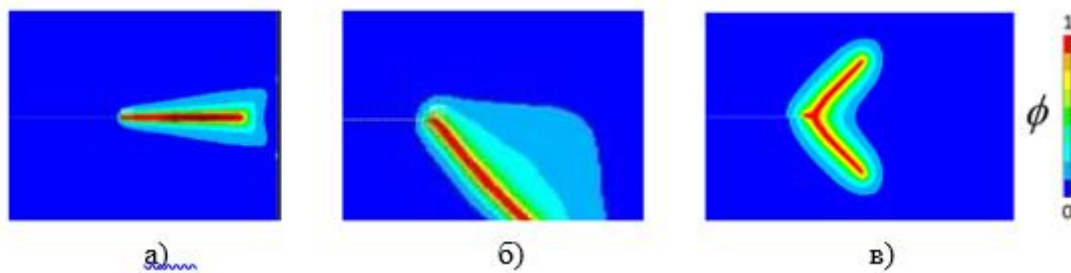


Рис. 1. Фазовые поля разрушения. а) - нормальный отрыв; б) – девиация трещины; в) - ветвление трещины

Вторая задача численного исследования относится к трехмерной пластине с поверхностной трещиной при двухосном нагружении (Рис. 2а). На Рис. 2б представлены фазовые поля разрушения для равнодвухосного растяжения. Полученные результаты позволяют описать процесс распространения трещины в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях.

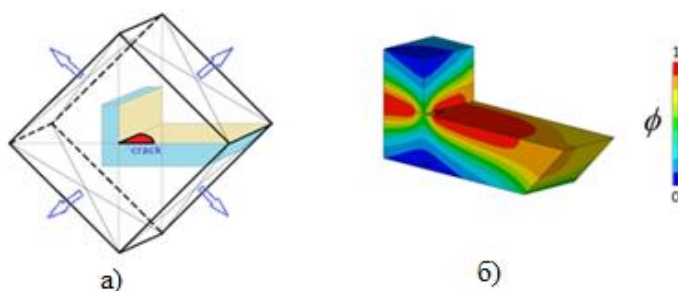


Рис. 2. Пластина с наклонной поверхностной трещиной. а) - схема нагружения; б) - фазовые поля разрушения

Результаты данного исследования подчеркивают значимость и перспективы применения фазовых полей в численном моделировании процессов разрушения материалов и элементов конструкций. Совершенствование методов моделирования и интеграция их в инженерную практику значительно повысят эффективность проектирования и анализа поведения материалов и элементов конструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №23-19-00158.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЛСТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ ПРИ ОДНОСТОРОННЕЙ ЗАКАЛКЕ: РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Салихова Н. К.<sup>1</sup>, Дудин Д. С.<sup>1</sup>, Келлер И. Э.<sup>1</sup>, Гачегова Е. А.<sup>1</sup>, Максимов А. Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, дом 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614018, Российская Федерация, [salikhova@icmm.ru](mailto:salikhova@icmm.ru)

<sup>2</sup>Керченский государственный морской технологический университет, дом 82, ул. Орджоникидзе, г. Керчь, 298309, Российская Федерация

В работе численно исследовался упругопластический изгиб плоского образца из прочной судовой стали А32, подвергнутого одностороннему ускоренному охлаждению водой. В процессе такого термомеханического воздействия в образце возникают искажения и остаточные напряжения, порождаемые собственными деформациями, для описания которых рассматривается связанная термоупругопластическая задача. Технологический процесс закалки заключался в следующем: сначала толстолистовой прокат, имеющий толщину 14,4 мм, нагревался до 900°C, затем в лабораторной установке его торцевая поверхность подвергалась ускоренному одностороннему охлаждению водой со скоростью 50-80°C/с [1, 2]. Далее из средней части заготовок вырезались образцы размером 300×10×14,4 мм с учетом требований стандарта [3].

С применением программного комплекса Comsol Multiphysics® выполнены расчеты и анализ теплового и напряженно-деформированного состояний стального плоского образца, подвергнутого термической обработке – односторонней закалке. Закалочная среда (вода при температуре 20°C) в численном эксперименте явно не моделировалась, а описывалась теплообменом конвекцией, в котором задавался коэффициент теплопередачи воды, в зависимости от температуры. В расчетах учитывался теплообмен с окружающей средой, температура которой составляла 20°C. Установлено, что вследствие односторонней закалки водой наблюдается изгиб выпуклостью в сторону неохлаждаемой поверхности. Получено, что на верхней торцевой поверхности образца формируется слой сжимающих остаточных напряжений, возникающий в результате градиента температуры по толщине слоя и структурно-фазовых превращений. Пластические деформации распределены примерно до середины толщины плоского слоя образца, при этом внутренние слои подвергнуты растягивающим остаточным напряжениям. Для соответствия результатов численного расчета эксперименту распределение остаточных напряжений по толщине листа определялось методом разрезания [4], причем значения вблизи границ определялось методом сверления отверстий. Подобная технология термической обработки создает сжимающие остаточные напряжения вблизи поверхностей листа, что важно для повышения его коррозионной стойкости, а также увеличивает характеристики прочности [5].

## Литература

1. А.Б. Максимов, И.П. Шевченко, И.С. Ерохина. Толстолистовой прокат с изменяющимися механическими свойствами по толщине. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019, Т. 62, № 8, 587-593.
2. А.Б. Максимов, Ю.Г. Пронина. Исследование изгиба толстолистового проката с градиентом прочностных свойств по толщине. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2022, Т. 65, № 1, 21-27.
3. ГОСТ 14019-80 «Металлы. Методы испытания на изгиб»
4. Келлер И.Э., Петухов Д.С., Дудин Д.С., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н. Способ определения остаточных напряжений в ребре на жестком основании. Патент на изобретение № RU 2797771 С1 от 08.06.2023
5. A.B. Maksimov, I.S. Erokhina. Properties of rolled plate with strength gradient across thickness. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2021, Vol. 12, No. 1, 172-176.

# ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ СДВИГОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КАК РЕЗУЛЬТАТА САМООРГАНИЗОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЕ МАТЕРИАЛОВ

Соковиков М. А.<sup>1</sup>, Симонов М. Ю.<sup>2</sup>, Чудинов В. В.<sup>1</sup>, Оборин В. А.<sup>1</sup>,  
Уваров С. В.<sup>1</sup>, Наймарк О. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, 1, Академика Королева, Пермь,  
614013, Россия, sokovikov@icmm.ru

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29,  
Комсомольский пр-кт, Пермь, 614990, Россия

В данном исследовании изучается один из механизмов локализации пластической деформации обусловленный самоорганизованными процессами в дефектной структуре материалов при различных видах нагружения [1].

Проводилось исследование механизма локализации пластического сдвига при динамическом нагружении на установке Гопкинсона – Кольского образцов, обеспечивающих реализацию плоского деформированного состояния [2], образцов, в которых реализуется динамическое кручение, а также скошенных цилиндрических образцов [3] из сплава АМгб и при пробивании.

Величины температурных полей, измеренные «in-situ», в зоне локализации не подтверждают традиционные представления о механизме локализации деформации, обусловленном термопластической неустойчивостью для исследованных материалов и реализованных режимах нагружения [4-12].

Данные экспериментальных исследований, изучение структуры деформированных образцов, а также данные численного моделирования [4-12], проведенного с учетом особенностей кинетики накопления мезодефектов в материале, позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов и реализованных условий нагружения обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов.

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30041), <https://rscf.ru/en/project/21-79-30041/>.

## Литература

1. О.Б. Наймарк. Физическая мезомеханика. 2003, Т. 6, № 4, 45-72.
2. Bagus Budiwanto, Muhammad A. Kariem, Burhan Febrinawarta. *International Journal of Impact Engineering*. 2022, V. 149, p. 1- 16.
3. Gianfranco D'Anna and Franco Nori, *Physical Review Letters*. 2000, V. 85, № 19, p. 4096 – 4099.
4. 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, В. 23, с. 82 - 88.
5. Д.А. Билалов, М.А. Соковиков, В.В. Чудинов. *Деформация и разрушение материалов*. 2017, № 5, с. 43-47.
6. 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. 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. М.А. Соковиков, М.Ю. Симонов, Д.А. Билалов, Ю.Н. Симонов, О.Б. Наймарк. *Физическая мезомеханика*. 2020, Т. 23, № 2, с.45–57.
9. М.А. Соковиков, М.Ю. Симонов, В.А. Оборин, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2021, Т. 14, № 3, с. 300-311.
10. М.А. Соковиков, В.А. Оборин, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2021, №3, с.154-162.
11. M. Sokovikov, S. Uvarov, M. Simonov, V. Oborin, V. Chudinov, O. Naimark. *Procedia Structural Integrity*. 2023, V.47, p. 693–697.
12. М.А. Соковиков, М.Ю. Симонов, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, В.А. Оборин, О.Б. Наймарк, *Вестник ПНИПУ. Механика* 2023, № 4, с. 110–120.



# ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА НА РАЗВИТИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ И НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЕЙ

Синев И. О.<sup>1</sup>, Белецкий Е. Н.<sup>1</sup>, Левин В. П.<sup>1</sup>, Ботвина Л. Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, 49, Ленинский пр., Москва, 199334, Россия, ivan-sinev@yandex.ru

Оценка состояния и остаточного ресурса материалов конструкций в ходе эксплуатации является важнейшей задачей в промышленности для предотвращения отказов, аварий и катастроф. Ресурс металлоконструкций при статическом и циклическом нагружении во многом определяется кинетикой малых дефектов, формирующихся в процессе нагружения.

В рамках данной работы были испытаны образцы из сталей 20 и 12Х18Н10Т с разным размером зерна при статическом растяжении на установке Instron 3382 (максимальная нагрузка 100 кН). Плоские образцы из стали 20 изготовлены с боковым надрезом (коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_{\sigma} \sim 2.9$ ) толщиной 4 мм и размером зерна 27 и 98 мкм [1]. Корсетные образцы из стали 12Х18Н10Т изготовлены из листа толщиной 2,5 мм и закалены при температурах 950, 1100 и 1200 °С с последующим охлаждением в воде. Размер зерна составил 21, 117 и 280 мкм соответственно.

В процессе периодических остановок растяжения на полированной поверхности образцов методом оптической микроскопии получены картины множественного разрушения при разных значениях деформации. Путем обработки снимков с помощью программы анализа изображений оценивались средняя длина ( $L_{cp}$ , мкм), плотность ( $n$ ,  $1/\text{мкм}^2$ ) и суммарная площадь микротрещин ( $S$ ,  $\text{мкм}^2$ ) на разных стадиях нагружения. При этом рассматривали трещины длиной не менее 5 мкм (трещины меньшей длины трудноотличимы от крупных пор или цепочек пор). По результатам измерений оценивали относительную площадь поврежденной поверхности  $S^*$ , равную отношению площади, занятой микротрещинами, к площади кадра, а также концентрационный  $k$ -критерий поврежденности по соотношению  $k = 1/(L_{cp} \cdot \sqrt{n})$  [2]. Были построены кумулятивные распределения концентрации микротрещин по их длине на разных этапах разрушения и оценены показатели степенного соотношения ( $b$ ) и экспоненциального ( $c$ ), аппроксимирующих полученные кривые.

Анализ изменения характеристик поврежденности позволяет выделить три стадии накопления повреждений в исследуемых сталях – стадию образования и накопления микротрещин (I), их слияния (II), ускоренного роста и раскрытия перед формированием макротрещины (III). Выделенные стадии коррелируют со стадиями упругого деформирования до достижения предела текучести (I), упрочнения (II), оцениваемого по изменению угла наклона кривой деформации [3], достижения предела прочности (III) и стадии долома образца (IV), характеризующей область от предела прочности до разрушения. Показана корреляция с физическими свойствами материала, оцениваемыми методами неразрушающего контроля.

Установлено, что увеличение размера зерна, толщины образца и снижение концентрации напряжений приводит к более позднему началу формирования поверхностных микротрещин в зоне пластической деформации, количественному снижению доли поверхности, занятой микротрещинами и более позднему началу процесса слияния дефектов. Подобные изменения являются следствием изменения стесненности пластической деформации и напряженно-деформированного состояния образца в пластической зоне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №23-19-00784).

## Литература

1. Н.А. Жаркова, Л.Р. Ботвина, М.Р. Тюмин. *Металлы*. 2007, № 3, 64–71.
2. L.R. Botvina, A.P. Soldatenkov. *Metallofiz. i noveishie tekhnologii*. 2017, Vol. 39, № 4, 477–490.
3. Л.М. Рыбакова. *Вестн. машиностроения*. 1993, № 3, 32–37.

# ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРАЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ С ГРАНИЦАМИ ЗЕРЕН В РАМКАХ ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

Курмоярцева К. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Россия, kurmoiartseva.k@mail.ru

Границы зерен в поликристаллических материалах оказывают значительное влияние на поведение материала, являясь препятствиями для движения дислокаций [1,2 и др.]. Экспериментальным исследованиям взаимодействия дислокаций с границами зерен посвящено значительное число работ, начиная с [3,4 и др.]. Существуют различные сценарии взаимодействия дислокаций с границами зерен, такие как образование скопления дислокаций перед границей, поглощение дислокаций границами, переход дислокаций в соседние зерна с образованием дислокаций ориентационного несоответствия [5,6 и др.].

Целью настоящей работы является разработка прямой дислокационно-ориентированной модели для описания поведения поликристаллических материалов с учетом взаимодействия дислокаций с границами зерен. Предполагается расширить существующую дислокационно-ориентированную модель [7], добавив подмодель потоков дислокаций между кристаллитами (зернами, субзернами, фрагментами).

Исходная модель разработана в рамках многоуровневого подхода и физических теорий пластичности. Вводятся внутренние переменные, характеризующие внутреннюю структуру материала. Данный подход обладает универсальностью и позволяет в явной форме описать эволюцию внутренней структуры материала через внутренние переменные [8]. Многоуровневые модели, в рамках данного подхода и с учетом эволюции дислокаций на системах скольжения (СС), позволяют явно описывать физические механизмы и их носители.

В рамках одного зерна возможно неоднородное распределение дислокаций. Механизмами эволюции плотностей дислокаций служат аннигиляция дислокаций, зарождение новых дислокаций в результате работы источников Франка-Рида и переход дислокаций между кристаллитами и зернами. Подмодель учета потоков дислокаций позволяет моделировать неоднородность распределения дислокаций внутри зерна, которая может привести к разрушению. В рамках этой подмодели решаются следующие задачи: определение СС, пересекающих фасетку границы; определение наиболее благоприятной для перехода СС в соседнем кристаллите; нахождение остаточных дислокаций в фасетке границы и непосредственно приток и отток дислокаций. Данная подмодель реализована на примере бикристалла. Проведены тестовые расчеты и показаны качественные результаты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

## Литература

1. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Границы зерен и свойства металлов. Изд-во Металлургия, 1987, 214 с.
2. Мак Лин Д. Границы зерен в металлах. Изд-во Металлургиздат, 1960, 322 с.
3. Z. Shen, R.H. Wagoner, W.A.T. Clark. *Acta Metallurgic.* 1988, V. 36, № 12, 3231–3242.
4. T.C. Lee, I.M. Robertson, H.K. Birnbaum. *Philosophical Magazine A. Taylor & Francis*, 1990, V. 62, № 1, 131–153.
5. J. Kacher, B.P. Eftink, B. Cui, I.M. Robertson. *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* 2014, V. 18, № 4, 227–243.
6. Javaid F., Pouriaeyevali H., Durst K. *Journal of Materials Research.* 2021. Vol. 36. № 12. 2545–2557.
7. Грибов Д.С., Трусов П.В. *Физическая мезомеханика.* 2022. Т. 25, № 4, С.94-105.
8. Трусов П.В., Швейкин А.И. *Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения.* Изд-во СО РАН, 2019. 605 с.

# НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА-КУЭТТА ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, Комсомольская,  
Екатеринбург, 620049, Россия*

В работе получено аналитическое решение уравнений Навье-Стокса, описывающее нестационарное адвективное (слоистое) течение вращающейся несжимаемой вязкой жидкости по твердой поверхности. Течение описывается в приближении  $f$  – плоскости.

Свободная граница полагается плоской, параллельной твердой поверхности (гипотеза твердой крышки). На твердой поверхности заданы условия прилипания, на свободной поверхности заданы касательные напряжения, моделирующие воздействие ветра.

Решение исходной системы представляется в следующем виде: для давления в виде линейной функции по горизонтальным координатам с коэффициентами, зависящими от вертикальной координаты  $z$  и времени  $t$ , для скоростей  $V_x$  и  $V_y$  - как функции координаты  $z$ , и времени  $t$ . Скорость  $V_z$  полагается равной нулю.

Решение задачи сводится к интегрированию линейного параболического уравнения второго порядка по времени и четвертого порядка по координате, содержащего смешанные производные. Получено уравнение, связывающее частоты по координате и времени, уравнение частот, собственные функции краевой задачи.

## *Литература*

1. Ekman V. W. On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean Currents // *Arkiv for matematik, Astronomi, och Fysic. Band 2. 1905. T. 11. S. 1-53.*
2. Сидоров А.Ф. Об одном классе решений уравнений газовой динамики и естественной конвекции. // *Численные и аналитические методы решения задач механики сплошной среды. УНЦ АН СССР - Свердловск, 1981. С.101-117.*
3. Аристов С.Н., 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.*
4. Gorshkov A. V., Prosviryakov E. Y. Inhomogeneous isothermal equatorial Poiseuille - Ekman flow. *AIP Conference Proceedings* 2315, 050008 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0036894>
5. Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю. Застойные точки неоднородного решения, описывающего конвективное течение Экмана в экваториальной зоне океана. // *Electronic resource] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures Issue 1, 2022 <http://dream-journal.org> ISSN 2410-9908 54 С. 52-66.*
6. Привалова В.В., Просвиряков Е.Ю. Новый класс точных решений уравнений Обербека-Буссинеска, описывающих несжимаемую жидкость // *Теоретические основы химических технологий, 2022, (56), №3 с.~ 337-344.*

## ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА – КУЭТТА ПРИ НАЛИЧИИ МАЛОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Горшков А. В., Просвиряков Е. Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН, 34, ул. Комсомольская,  
г. Екатеринбург, 620049, Россия.*

*Уральский Федеральный государственный университет, 19, ул. Мира,  
г. Екатеринбург, 620002, Россия.*

В работе рассматривается точное решение уравнений Навье-Стокса, описывающие течение вращающейся вязкой несжимаемой жидкости с учетом двух параметров Кориолиса [1,2]. Компоненты скоростей строятся в виде линейных функций, а давление в виде квадратичной функции горизонтальных координат. Показано, что для этого класса решений условия существования слоистого течения не выполняются.

Используется более широкий класс решений с малой вертикальной компонентой скорости. Построено асимптотическое приближение решение в виде отрезка ряда по степеням малого параметра, характеризующего отношение масштабов вертикальной и горизонтальной компонент скорости. Вычисление коэффициентов разложения сводится к интегрированию последовательности однотипных систем обыкновенных неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. На каждом шаге решение получается в виде квазиполиномов экспонент с комплексными показателями.

### *Литература*

1. Ekman V. W. *On the Influence of the Earths Rotation on Ocean Currents* // *Arkiv for matematik, Astronomi, och Fysic. Band 2. 1905. T. 11. C. 1-53.*
2. Горшков А.В., Просвиряков Е.Ю. *Конвективное слоистое течение Экмана вязкой несжимаемой жидкости*// *Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2018, том 54, № 2, с. 213–220.*
3. Аристов С.Н., Шварц К.Г. *Вихревые течения адвективной природы во вращающемся слое жидкости.* - Пермь, 2006. - 155 с.
4. Аристов С.Н., Шварц К.Г. *Вихревые течения в тонких слоях жидкости.* - Киров: ВятГУ, 2011. - 207 с.
5. Аристов С.Н., Полянин А.Д. *Новый метод построения точных решений трехмерных уравнений Навье-Стокса и Эйлера* // *Теор. основы хим. технологии. 2011. Т. 45. № 6. С. 696–701.*

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА СРОКА СЛУЖБЫ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИДОВ ЖЕЛЕЗА\*

Кулевич В. П.<sup>1</sup>, Богданов А. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет, 28, проспект Ленина,  
Волгоград, 400005, Россия, kulevich.vp@gmail.com

В работе представлены результаты исследования жаростойкости алюминидных покрытий, сформированных на легированных сплавах на основе железа, при температурах до 1300 °С.

Количественную оценку влияния химического состава алюминидных покрытий на их жаростойкие свойства проводили на алитированных сплавах Ст3, 15Х5, Х15Ю5, Х23Ю5 и 12Х18Н10Т.

Жаростойкость покрытий лимитируется скоростью образования сплошной защитной пленки на основе  $Al_2O_3$  и ее возобновления после частичного отслаивания в процессе эксплуатации, а также скоростью снижения содержания Al в поверхностных слоях из-за диффузионного перераспределения компонентов.

Оценку жаростойкости проводили по изменению массы образцов в процессе длительных высокотемпературных испытаний, а расчет срока службы проводили по изменению концентрации Al в поверхностном слое до 10 ат.% Al. Характер окисления покрытий после испытаний изучали рентгеноструктурным методом скользящего пучка.

Окисление алитированных сплавов Х15Ю5 и Х23Ю5 при 1100 °С протекает в две стадии, на которых изменение массы образцов с течением времени подчиняется сначала параболическому закону, сопровождающемуся формированием и ростом стабильной оксидной пленки, а затем логарифмическому закону, характеризующемуся низкой скоростью окисления. Окисление сплава Х15Ю5 и алитированных сплавов 15Х5 и 12Х18Н10Т протекает с более высокой скоростью по линейной или параболической, переходящей в линейную, зависимости.

Минимальную глубину проникновения коррозии после высокотемпературных испытаний при 1100 °С в течение 500 ч показал образец легированного Si алитированного сплава Х15Ю5 – 2,5 мкм. Аналогичное покрытие, не легированное Si, подверглось коррозии на глубину 3,3 мкм. Увеличение содержания Cr в составе покрытия на сплаве Х23Ю5 привело к увеличению глубины проникновения коррозии до 8,9 мкм, что связано с формированием богатых Cr оксидов. Повышение температуры испытаний до 1300 °С показало лучшие свойства у алитированного сплава Х23Ю5 по сравнению с другими.

Время сохранения жаростойких свойств, оцененное по изменению концентрации Al (до 10 ат. %) в поверхностном слое покрытий при высокотемпературных испытаниях при 1100 °С, составило: для покрытий на Х23Ю5 ~ 20000 ч, на Х15Ю5 ~ 6000 ч, на 12Х18Н10Т ~ 2000 ч, а для сплава Х15Ю5 ~ 130 ч.

\*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10246,  
<https://rscf.ru/project/21-79-10246/>

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ Ti-Al СПЛАВОВ С НАНО СТРУКТУРОЙ

Чепак-Гизбрехт М. В.<sup>1</sup>, Князева А. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИФПМ СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634021, Россия, [mv2016@mail.ru](mailto:mv2016@mail.ru)

<sup>2</sup>ИФПМ СО РАН, 2/4, пр. Академический, Томск, 634021, Россия, [anna-knyazeva@mail.ru](mailto:anna-knyazeva@mail.ru)

Интерметаллидные сплавы на основе титана и алюминия используют для изготовления элементов турбин в авиастроении. Изготовление этих сплавов происходит с использованием порошковой металлургии и аддитивных технологий, что обеспечивает особенную структуру с размерами зерна от десятка нано метров до нескольких микрометров [1]. Получающаяся в результате обработки структура материала приводит к повышенным механическим свойствам в сочетании с легким весом. Проблема заключается в активации ускоренного механизма окисления при температурах выше 800 °С, которое напрямую связано с мелкозернистой структурой. Кислород активно диффундирует вдоль границ зерен с образованием оксидов титана и алюминия. Добавление легирующих компонентов приводит к торможению окисления при одних температурах и ускорению окисления при других температурах [1]. Механизмы влияния различных добавок на динамику окисления активно исследуются в настоящее время и на данный момент оптимальный состав еще не найден. Таким образом, существует потребность в фундаментальном теоретическом исследовании динамики окисления Ti-Al сплавов с учетом микроструктуры.

В настоящей работе мы предлагаем использовать двумерную диффузионно-кинетическую модель, в которой явно выделены зерна и границы [2]. Полагаем, что материал образца представлен симметричной структурой. На свободной поверхности образца находится постоянный источник кислорода, а вдали от этой поверхности сток кислорода отсутствует. Диффузия кислорода происходит со свободной поверхности в прилежащие зерна и вдоль границ согласно закону Фика с учетом расхода на окисление. В перпендикулярном к свободной поверхности направлении выполняется условие симметрии. В начальный момент времени кислород и продукты реакции в материале отсутствуют. С течением времени по всей площади образца происходит разложение интерметаллида на титан и алюминий. Поступление кислорода из поверхности вглубь образца способствует образованию оксидов титана и алюминия. Т. е., уравнение диффузии дополнено кинетическими уравнениями для каждого из вновь образующихся компонентов. Коэффициенты диффузии и константы реакций в зернах и границах могут различаться. Задача решена численно с использованием неявной разностной схемы для диффузионной части задачи и явной схемы, аналогичной методу Эйлера для кинетической части. Частные варианты численного решения согласуются с известными аналитическими решениями.

Таким образом, моделирование позволяет исследовать динамику накопления кислорода и образования оксидов для TiAl, Ti<sub>3</sub>Al и материала с зернами разного состава (TiAl и Ti<sub>3</sub>Al). Получены двумерные распределения концентраций и интегральное накопление оксидов в окисленном слое, проведена оценка глубины проникновения кислорода вследствие зернограницной диффузии и толщины окисленного слоя, проанализированы зависимости результатов моделирования от размеров зерна и построения геометрии расчетной области (тройные и четверные стыки между соседними зернами). Результаты расчетов косвенно согласуются с данными экспериментов по высокотемпературному окислению TiAl и Ti<sub>3</sub>Al [1].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.

## Литература

1. Й. Гарипа, О. Оздемир. *Физика металлов и металловедение*. 2020, Т. 121, № 4, 365-372.
2. М.В. Чепак-Гизбрехт, А.Г. Князева. *Ученые записки казанского университета*. 2023, Т. 165, кн. 3, 307 – 321.

## СИНТЕЗ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СЛОЕВ Ni-AL МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Федорова Е. Н.<sup>1,2\*</sup>, Суходоева Н. В.<sup>1</sup>, Алтунин Р. Р.<sup>1</sup>, Самойло А. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, 79, пр. Свободный, г. Красноярск, 660041, Россия,  
\* efedorova@sfu-kras.ru

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,  
53, пр. Мира, г. Красноярск, 660049, Россия

Благодаря высокой жаростойкости и износостойкости интерметаллиды системы Ni-Al широко используются в качестве защитных покрытий для высокотемпературных сталей и сплавов. Материал также применяется в качестве жаростойкого подслоя в системах теплозащитных покрытий для сплавов на основе никеля авиационного назначения.

Несмотря на стойкость материала к высокотемпературному окислению, многие авторы отмечают проблемы адгезии, связанные с образованием пустот и полостей на поверхности раздела оксидный слой/покрытие, а также уменьшение концентрации Al за счет диффузионных процессов и формирования на поверхности Ni-Al метастабильных фаз Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [1-2].

Метод магнетронного распыления позволяет наносить однородные по толщине тонкие покрытия Ni-Al при достаточно высоких скоростях осаждения. Сохранение мелкозернистой структуры покрытий способствует увеличению прочности адгезии Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, формирующегося при окислении в условиях рабочих температур [3].

Данное исследование направлено на разработку режимов синтеза интерметаллидных слоев Ni-Al с различным соотношением Ni/Al методом магнетронного распыления и последующего обжига в инертной атмосфере при низких температурах 450-550 °С, способствующих сохранению мелкозернистой структуры. Интерметаллидные слои β-NiAl (50Ni-50Al) и γ'+γ (80Ni-20Al) наносились на поверхность образцов жаропрочного сплава на основе никеля ЖС32 путем послойного напыления на установке EPOS-PVD-D-CONFOCAL в лаборатории электронной микроскопии ЦКП СФУ.

Методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионного анализа (ЭДА) и рентгенофазового анализа (РФА) исследованы особенности микроструктуры, элементного и фазового состава полученных покрытий в зависимости параметров нанесения и температуры обжига.

На рисунке 1 приведено СЭМ-изображение поверхности и поперечного среза покрытия Ni-Al, полученного методом магнетронного распыления и последующего обжига при 450 °С на сплаве ЖС32.

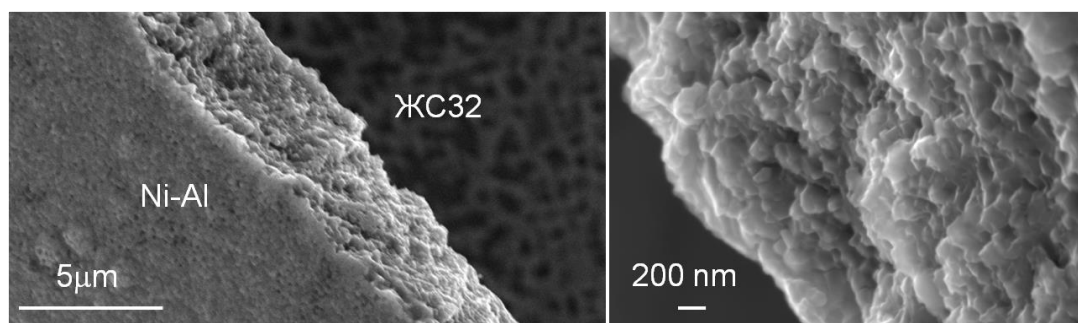


Рис. 1. СЭМ-изображение покрытия Ni-Al на поверхности сплава ЖС32 после обжига при 450 °С

### Литература

1. M.W. Brumm, H.J. Grabke. *Corrosion Science*. 1993, V.34, P. 547-561.
2. Y. He, L. Luo, M. L. Sushko, C. Liu, D. R. Baer, D. K. Schreiber, K. M. Rosso, C. Wang. *Materialia*. 2020, V.12, P.100783.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРАТКОВРЕМЕННОЙ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ 15X2НМФАА МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Свиридов Г. Б., Марченков А. Ю., Панькина А. А.

НИУ «МЭИ», 14, ул. Красноказарменная, г. Москва, 111250, Россия,

e-mail: [SviridovGeorB@mpei.ru](mailto:SviridovGeorB@mpei.ru)

Метод инструментального (кинетического) индентирования, основанный на вдавливании индентора с регистрацией диаграммы вдавливания «нагрузка - перемещение индентора», успешно применяется для контроля твёрдости и модуля нормальной упругости материалов. Методическая и приборная база метода активно совершенствуется, и в настоящее время уже разработаны методики преобразования диаграмм вдавливания индентора в диаграммы растяжения [1], что позволяет определять кратковременные характеристики статической прочности и пластичности для некоторых сталей и сплавов. Для материалов, применяемых в энергетическом машиностроении и эксплуатирующихся при высоких температурах (до 600°C), актуальной является информация не только о кратковременных механических свойствах, но и о характеристиках длительной прочности. Эти характеристики можно также определять инструментальным индентированием, проводя испытания при высоких температурах, и такие исследования активно проводятся в последние годы [2, 3]. В настоящей работе проведены исследования высокотемпературным инструментальным индентированием стали 15X2НМФАА, применяемой для изготовления элементов энергетического оборудования АЭС, в диапазоне температур 500-600°C.

Исследования выполнены на испытательной машине Instron 5982 с использованием специально разработанной оснастки с принудительным водяным охлаждением. В качестве

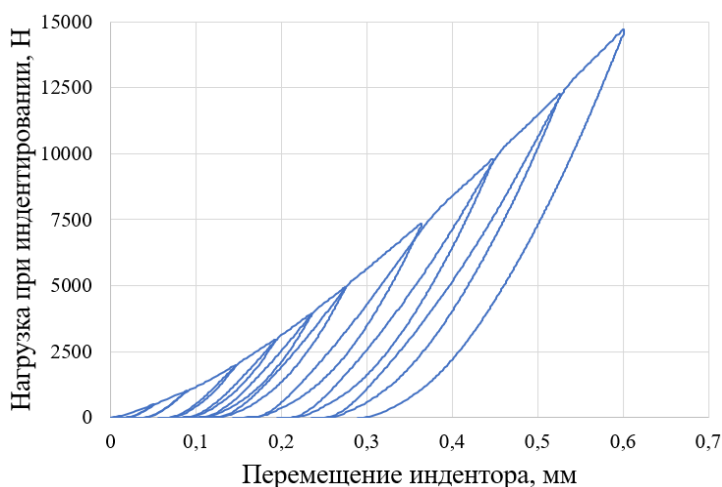


Рис. 1. Диаграмма ступенчатого индентирования стали 15X2НМФАА при температуре 600°C (диаметр индентора  $D = 10$  мм)

испытуемого материала использовали плоские шлифы из стали 15X2НМФАА, изготовленные из прутка  $\varnothing 20$  мм. Для определения характеристик кратковременной твёрдости, прочности и пластичности проводили ступенчатое вдавливание индентора с увеличивающейся нагрузкой вдавливания. Одна из диаграмм нагружения, зарегистрированная при температуре 600°C, приведена на рисунке 1. Для определения характеристик длительной прочности проводили длительное нагружение при постоянной

нагрузке вдавливания. В качестве референсных данных использовали результаты испытаний растяжением и испытаний на ползучесть, выполненных ранее на образцах из этого же материала.

Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10140, <https://rscf.ru/project/23-79-10140/>

## Литература

1. В.М. Матюнин и др. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022, №2, 54 – 63.
2. J. Bredl, et. al. Nuclear Materials and Energy. 2016, Vol. 9, 502-507.
3. C. Schneider-Maunoury, et. al. Materials Today Communications. 2020, Vol. 25. 101451.



# УПРОЧНЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ГУСЕНИЧНЫХ И КОЛЕСНЫХ МАШИН ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ С ВИНТОВЫМ ОБЖАТИЕМ

Волков К. Г.<sup>1</sup>, Дементьев В. Б.<sup>1</sup>

*Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, д. 34, ул. Татьяны Барамзиной, г. Ижевск, 426067, Российская Федерация*

## **Реферат**

*В работе приведены сравнительные данные по прочностным и пластическим характеристикам стальных образцов, изготовленных с применением высокотемпературной термомеханической обработки с винтовым обжатием (ВТМО ВО) и обычной термообработкой в камерных печах. Приведена типовая технологическая схема изготовления цилиндрических деталей ходовой части гусеничных и колесных машин с применением ВТМО ВО.*

**Ключевые слова:** ВТМО, винтовое обжатие, упрочнение, цилиндрические детали, термообработка.

**Аннотация.** В конструкции ходовой части гусеничных и колесных машин присутствует большое количество полых и полнотелых цилиндрических деталей: оси вращения, оси качания, цапфы, шкворни и т.д. Детали данного узла испытывают различные воздействия: изгибающие моменты, нагрузки на срез, абразивное изнашивание и др. Зачастую подобные детали обладают недостаточным фактическим ресурсом, который может быть до 60% меньшим по сравнению с заявленным. Ранний выход из строя подобных деталей, чаще всего, связан с нарушением герметичности сопряжения оси, цапфы или шкворня с ответной деталью, что, в свою очередь, приводит к повышенному абразивному износу. Второй причиной выхода из строя может быть хрупкий излом, вызванный воздействием однократной критической нагрузки [3, 7]. В ходовой части сельскохозяйственных машин, в большей степени, используют стали 45 и 40Х. Для деталей ходовой части военных гусеничных и колесных машин используются стали 38ХС, 30ХН3А, 38Х2МЮА, 40ХН2МА и др. Использование сталей 45 и 40Х в сельскохозяйственных машинах обуславливается требованиями низкой себестоимости деталей, их распространенностью и доступностью в качестве запасных частей. В угоду этих требований, эксплуатационные характеристики и долговечность цилиндрических деталей ходовой части гусеничных и колесных сельскохозяйственных машин остаются недостаточными. Для техники военного назначения требования по долговечности и эксплуатационной надежности являются одними из основных, исходя из чего в данных машинах используются более дорогостоящие материалы, которые, однако, не способны обеспечить ресурса детали, изготовленной из приведенных ранее материалов, соответствующего ресурсу всей машины. При этом, зачастую, замена или ремонт некоторых деталей ходовой части военных гусеничных или колесных машин в условиях базирования является затруднительным или невозможным [8]. Исходя из вышесказанного, основной целью данной работы является разработка способа изготовления упрочненных цилиндрических деталей ходовой части гусеничных или колесных машин с использованием высокотемпературной термомеханической обработки с винтовым обжатием.

**Материалы и методы.** Для исследований были использованы образцы из горячекатанного круглого проката стали 40Х по ГОСТ 2590-2006. Для реализации высокотемпературной термомеханической обработки с винтовым обжатием (ВТМО ВО) использовалась установка УВО 250-20, конструктивные особенности и диапазон технологических режимов которой приведены в работе [4]. Согласно проведенным исследованиям, представленным в [1, 4], оптимальными режимами ВТМО ВО являются суммарная степень деформации  $\lambda = 25\%$ , доля деформации кручением 14%, температура деформации 950°C, частота вращения заготовки  $\omega = 2,3 \text{ с}^{-1}$ , скорость продольного перемещения  $v = 0,004 \text{ м/с}$ , температура отпуска 200°C, время выдержки 60 мин. Исследования механических характеристик образцов после ВТМО ВО проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84. Ударная вязкость исследовалась на образцах типа I по ГОСТ 9454-78.

**Результаты и обсуждение.** Усредненные результаты исследований механических характеристик пяти образцов, полученных в результате экспериментальной отработки, приведены в таблице 1. Также в таблице 1, для сравнения, представлены механические характеристики других материалов, представленных в работах [2, 6], прошедших термическую обработку в камерных печах.

Таблица 1 – Механические характеристики исследуемых сталей

Материал	Вид обработки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU <sup>+20</sup> , кДж/м <sup>2</sup>
40X	ВТМО ВО, $t_{\text{деф}} = 950^\circ\text{C}$ , отпуск $t_{\text{отп}} = 200^\circ\text{C}$	1940	1750	9	39	550
40X	Закалка $t_{\text{зак}} = 850^\circ\text{C}$ , отпуск $t_{\text{отп}} = 200^\circ\text{C}$	1760	1560	8	35	290
38X2МЮА	Закалка $t_{\text{зак}} = 900^\circ\text{C}$ , отпуск $t_{\text{отп}} = 300^\circ\text{C}$	1810	1660	8	43	390
40ХН2МА	Закалка $t_{\text{зак}} = 850^\circ\text{C}$ , отпуск $t_{\text{отп}} = 200^\circ\text{C}$	1750	1600	10	50	590

Как видно из таблицы 1, сталь 40X, прошедшая ВТМО ВО, обладает более высокими прочностными показателями, чем сталь 40X, подвергнутая печной закалке в воду и отпуску: предел прочности  $\sigma_b$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительное сужение выше на 10%, относительное удлинение увеличилось на 12%, ударная вязкость KCU<sup>+20</sup> выше на 47%. Также из таблицы 1 видно, что параметры стали 40X после ВТМО ВО имеют достаточно близкие прочностные и пластические характеристики с более дорогими сталями 38X2МЮА и 40ХН2МА.

Согласно [5], при ВТМО ВО также наблюдается двукратное повышение усталостной прочности по сравнению с образцами, прошедшими обычную закалку и отпуск. Помимо этого, повышается стойкость к абразивному изнашиванию. Данный эффект объясняется не только повышенными механическими характеристиками стали, но и высокими качественными и количественными показателями поверхности изготавливаемых деталей. В результате ВТМО ВО, наравне с низкой шероховатостью поверхности ( $Ra \leq 1,25$  мкм), наблюдается устранение поверхностных дефектов, уменьшение отклонения цилиндричности, разностенности трубных деталей, что напрямую зависит от технологических способов изготовления изделий.

Исходя из приведенных выше результатов исследований, можно сделать заключение о возможности использования процесса ВТМО ВО при изготовлении цилиндрических деталей ходовой части гусеничных и колесных машин. На рисунке 1 представлена типовая схема изготовления цилиндрических деталей с применением ВТМО ВО.

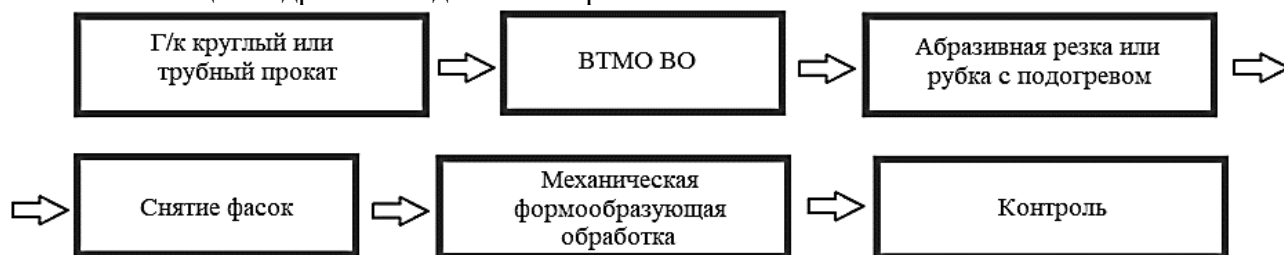


Рис. 1. Типовая технологическая схема изготовления цилиндрических деталей с применением ВТМО ВО

Предлагаемая технологическая схема позволяет исключить из технологических процессов операции по камерной печной термообработке и в некоторых случаях шлифовальной обработки цилиндрических поверхностей.

**Заключение.** В работе были рассмотрены возможности упрочнения цилиндрических деталей ходовой части гусеничных и колесных машин с применением высокотемпературной термомеханической обработки с винтовым обжатием. Использование ВТМО ВО в технологическом процессе изготовления деталей позволяет достигать повышенных прочностных и пластических характеристик сталей по сравнению со сталями, подвергнутыми

камерной печной термообработке. При этом существует возможность снижения затрат на приобретаемые материалы с одновременным повышением эксплуатационных характеристик и долговечности изготавливаемых деталей. На основе проведенных исследований разработана типовая технологическая схема изготовления цилиндрических деталей с применением ВТМО ВО.

#### *Литература*

1. А.А. Сухих, В.Б. Дементьев, Т.М. Махнева. *Химическая физика и мезоскопия*. 2022. Т24. №2. 228-237.
2. А.В. Степанчукова, Е.Ю. Приймак, И.Л. Яковлева, Н.А. Терещенко, Е.Ю. Чирков. *Вектор науки ТГУ*. 2017. №4. 141-148.
3. В.А. Марков, Ю.А. Карасев, Д.А. Попова. *RF Forestry*. 2023. 190-194.
4. В.Б. Дементьев, А.Д. Засыпкин, М.Ю. Стерхов, А.В. Чуркин. *Тракторы и сельхозмашины*. 2021. №3. 62-68.
5. В.Б. Дементьев, А.Д. Засыпкин. *Теория и практика обработки глубоких отверстий в горячекатанной трубной заготовке*. Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2014. 175 с.
6. В.Г. Сорокин. *Марочник сталей и сплавов*. Изд-во «Машиностроение». 1989. 640 с.
7. В.Л. Хрулёв, Б.Ш. Алимбаев. *Исследование триботехнических характеристик трибоузлов многоцелевых гусеничных и колесных машин. Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов: Сборник научных статей 3-й Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика А.А. Байкова, Курск, 15 сентября 2022 года*. 180-182.
8. В.Р. Эдигаров, В.В. Малый. *Транспорт. Транспортные и технологические машины*. 2014. Вып. 4. 57-64.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПУТЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Чаплыгин К. К.<sup>1</sup>, Воронин С. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королева,  
дом 34, улица Московское шоссе, город Самара, 443086, Россия, chapkostya96@mail.ru

Для определения механических свойств при производстве деталей и металлических заготовок для деталей авиации, машиностроения, нефтегазовой и других сфер традиционно применяются различные виды испытаний. Для этих целей предприятия имеют испытательные лаборатории и различное по своему назначению оборудование.

При эксплуатации готовых изделий не редко возникают ситуации, при которых требуется подтвердить заявленные свойства, либо оценить свойства спустя некоторое время эксплуатации. Однако изготовление образцов для испытаний требует выводить детали из эксплуатации с последующим её разрушением с целью проведения испытаний, что в некоторых случаях экономически нецелесообразно.

Огромное влияние на механические свойства имеют микроструктурные показатели металла, в том числе и локальные свойства каждого зерна по отдельности. В данной работе для определения локальных механических свойств предлагается использовать термическую обработку предварительно подготовленной поверхности изучаемого металла. В результате нагрева до температур, не оказывающих влияние на свойства, на поверхности металла образуется тонкая оксидная пленка, толщина которой зависит от кристаллографической ориентации зерна, на котором данная пленка образовалась. Получаемый слой оксида из-за изменения преломления света окрашивает зерна в различные цвета, зависящие от толщины пленки. Цвет зерна имеет прямую зависимость с механическими свойствами отдельного зерна.

В ходе проведенных экспериментов изучена окрашенная поверхность, получены данные о получаемых цветах и определена корреляция между наблюдаемым на поверхности цветом и его модулем упругости на образцах стали различных марок.

Исследование локальных механических свойств осуществлялось методом сканирующей зондовой микроскопии. Были получены карты распределения механических свойств на исследуемых зернах и их сопоставление с цветными изображениями микроструктуры, в ходе которого была определена зависимость между цветом зерна после температурной обработки и его модулем упругости.

Способ апробирован на различных марках сталей. Установлено, что данный способ травления применим в основном к низкоуглеродистым сталям. Это обусловлено тем, что при тепловом травлении окрашиваются только зерна феррита, а окрас перлитных зерен происходит за счет разрастания оксидной пленки на поверхностях соседних зерен. Также рост пленки при заданных режимах не наблюдается на мартенсите, бейните, карбидных и неметаллических включениях. Предложенный метод травления помогает выявлять крупные включения оксидов, отложившихся между зёрнами перлита, которые в отсутствие оксидной пленки тяжело определить визуально.

Результаты находят применение при определении направления прокатки, либо иной деформации, в случае если в лабораторных исследованиях установить его невозможно, например, после аварий. Также цветное изображение микроструктуры можно использовать для определения склонности металла к коррозионному растрескиванию, путем изучения аномальных зон скопления зерен одной ориентировки. Помимо этого цветное изображение контрастирует границы зерен, что может помочь при определении двойников, а также при тщательном изучении размеров зерен, поскольку становятся видно границы, ранее не уловимые глазом.

Также полученные данные предлагается использовать в качестве метода неразрушающего контроля механических свойств на эксплуатируемых изделиях.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА ИЗ УУКМ С ПОВРЕЖДЕННЫМИ ОБЛАСТЯМИ ПО ОКОНЧАНИИ ПРОЦЕССА ОСТЕОИНТЕГРАЦИИ

Разумовский Е. С.<sup>1</sup>, Шавшуков В. Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Россия, E-mail: erazumovskij@yandex.ru, shavshukov@pstu.ru*

Исследовано влияние биологического процесса остеointegrации [1] на изменение упругих модулей материала ножки эндопротеза тазобедренного сустава (ТБС) (углерод-углеродного композиционного материала – УУКМ) в областях с повреждениями кристаллитов пироуглерода [2]. Повреждения возникают в результате предельных нагрузок, совершаемых человеком, что приводит к снижению несущей способности ножки эндопротеза. В результате повреждений пироуглеродная (ПУ) матрица становится аналогичной сыпучей гранулированной среде, что существенно снижает упругие свойства материала в целом. При нахождении эндопротеза ТБС в теле человека мезенхимальные клетки и остеобласты мигрируют в области с повреждениями ПУ матрицы из-за увеличения проницаемости. В результате проникновения в поврежденные области происходит формирование дисперсно-упрочненного композиционного материала - костно-углеродного каркаса. Прочность такого материала обеспечивается отложением минеральных солей в новом костно-углеродном каркасе. Результатом такого биологического процесса является положительное изменение упругих модулей материала эндопротеза, что приводит к блокировке распространения областей повреждений и увеличению несущей способности эндопротеза ТБС [3].

Прогнозирование упругих модулей в поврежденных областях эндопротеза производится в два этапа. На первом этапе вычисляются упругие свойства новой матрицы в поврежденных областях, которая представляет собой сочетание остеобластов и ПУ матрицы УУКМ. На следующем этапе вычисляются эффективные свойства УУКМ с модифицированной матрицей. При прогнозировании упругих модулей используется прямой метод гомогенизации, реализованный в модуле Ansys Material Designer. Прогнозирование эффективных свойств трехмерно-армированного углерод-углеродного композиционного материала, в поры которого внедрены остеобласты, производится по модели Гарнопольского. При моделировании нагружения используются пространственные модели костей человека, полученные при помощи компьютерной томографии и преобразованные в твердотельные модели. Величина нагрузки на биомеханическую систему определяется несущей способностью ножки эндопротеза при повреждениях в 4х областях без учета внедрения остеобластов. В исследовании приведены результаты расчетов полей напряжений и деформаций для конструкции эндопротеза тазобедренного сустава, представлена диаграмма деформирования ножки эндопротеза в координатах нагрузка – перемещение, показывающая измененную несущую способность эндопротеза. Численные результаты наглядно демонстрируют влияние биологического процесса остеointegrации на изменение несущей способности эндопротеза.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2023-0006).

## *Литература*

1. М.Б. Убайдуллаев, А.Б. Вяткина. Изд-во ГБОУ ВПО БГМУ Минздрава России, 2015, 124 с.
2. V. Shavshukov, A. Tashkinov. *Modelling Simul. Mater. Sci.* 2008, Vol. 16. – 18 p.
3. Разумовский Е.С., Шавшуков В.Е. *Российский журнал биомеханики.* 2024, № 2[в печати].

# ОПИСАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦАХ ПРИ МНОГОУРОВНЕВОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Котельникова Н. В., Грибов Д. С.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
29, Комсомольский пр-т, Пермь, 614990, Россия, kotelnickova@gmail.com*

При теоретическом изучении поведения металлических изделий в процессах их изготовления и эксплуатации эффективным инструментом является разработка соответствующих математических моделей, ключевым элементом которых являются определяющие соотношения (конститутивные модели). В качестве последний в работе предлагается использовать многоуровневые физически-ориентированные модели, позволяющие описывать изменение внутренней структуры материалов и обладающие значительной универсальностью [1]. В таких моделях учитывается несколько структурно-масштабных уровней рассматриваемого образца или изделия, а также явным образом включаются носители механизмов пластического деформирования и иных процессов, протекающих в материале в ходе нагружения [2].

Основное внимание в исследовании уделяется описанию процесса зарождения трещин в границах зерен. На этот процесс влияют как условия изготовления и эксплуатации изделий, так и эволюционирующая внутренняя дефектная структура материала. Инициация межзеренного разрушения возможна при одновременной реализации нескольких ключевых условий: неоднородность неупругой деформации, наличие сильных барьеров для движения дислокаций (особенно – границ зерен, жестких включений), приводящих к декогезии (разрыву межатомных связей в области стыка зерен). Декогезия в границах возникает вследствие накопления в них дефектов различной природы – вакансий, пор, примесей и дислокаций. В работе в качестве основного механизма рассматривается скопление дислокаций в границе. В случае большой разориентации зерен часть внутриверенных дислокаций выходит на поверхность зерна, делая межзеренную границу «ступенчатой» и «рыхлой». В случае малой разориентации дислокации могут переходить через границу в соседнее зерно, но при этом в границе могут образовываться остаточные дислокации, также приводящие к нарушению в атомное строение границы. Также границы, поглотившие дислокации, характеризуются более высокой концентрацией напряжений [3].

В работе описание декогезии ассоциируется с процессом накопления поврежденности в зернограницной структуре. Вводится параметр  $\rho_{bound}$ , описывающий плотность зернограницных дислокаций между парой соседствующих зерен. Уравнение для описания эволюции этого параметра учитывает текущие плотности дислокаций в соседних зернах, а также их разориентацию. Предлагается способ оценки несплошности границы по параметру  $\rho_{bound}$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

## *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. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV.
2. Kurmoiartseva, K. Modeling of Polycrystalline Materials Deformation with Dislocation Structure Evolution and Transition to Fracture / K. Kurmoiartseva, N. Kotelnikova, P. Trusov // Communications in Computer and Information Science. – 2020. – Vol. 1304. – P. 80-94. – DOI 10.1007/978-3-030-66895-2\_6. – EDN JJMSOI.
3. E Bitzek et al 2009 Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 17 055008

# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРЕСС-ПУАНСОНА НА НАПРЯЖЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ОДНООСНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ВОСКООБРАЗНОГО ПОРОШКОВОГО ТЕЛА В ЗАКРЫТОЙ МАТРИЦЕ

Жилин С. Г., Богданова Н. А., Предеин В. В.

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.

[joyful289@inbox.ru](mailto:joyful289@inbox.ru)

Формирование качественных металлоизделий сложной пространственной конфигурации с высокой размерной и геометрической точностью достигается методами литья по выплавляемым моделям. Развитие технологических аспектов применения метода видится в перспективе расширения номенклатуры изделий. Одним из актуальных вариантов его модернизации является разрабатываемый метод формирования биметаллических отливок [1]. Реализация такого подхода предусматривает изготовление выплавляемой модели, геометрия поверхности которой формируется прессованием порошка компонента модельного материала в зазор между образующими стенками пресс-матрицы и установленным в ней каркасом. Управление параметрами уплотнения, связанными с решением проблемы упругого отклика уплотняемого материала, определила необходимость всестороннего исследования процесса, направленного на определение требуемого сочетания ряда факторов: фракции порошков, скорости прессования, времени выдержки материала под нагрузкой [2, 3]. В настоящей работе приводятся результаты экспериментов, согласно которым на основании анализа зависимостей (одна из которых представлена на рис.1) формируется вывод о наиболее предпочтительных вариантах деформирования фракций порошков воскообразного материала, при которых достигаются требуемые параметры конечной прессовки.

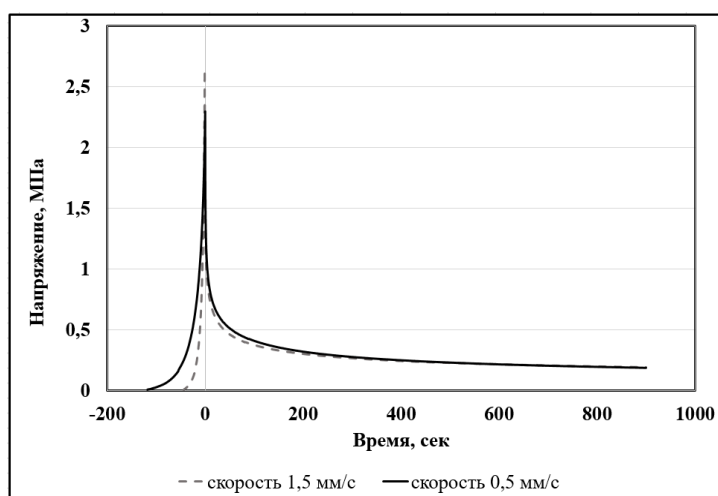


Рис. 1. Сравнение зависимостей напряжений от времени выдержки под нагрузкой при уплотнении и релаксации материалов, деформируемых с разной скоростью

\*Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН

## Литература

1. Богданова Н.А., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Способ получения биметаллической отливки // Патент на изобретение RU 2696118 C1, 31.07.2019. Заявка № 2018140932 от 21.11.2018;
2. Bogdanova N.A., Zhilin S.G., Komarov O.N. Influence of the packing and compaction parameters of spherical waxy elements on the stress-strain state of the compact // *Procedia Structural Integrity. 15th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2021. Elsevier B.V., 2022. С. 70-74;*
3. Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Исследование процессов формирования пористых выплавляемых моделей, применяемых для изготовления высокоточного литья // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2023. Т. 29. № 3. С. 54-66.*

## ДВУХУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ АДДИТИВНОГО АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВОГО СПЛАВА

Гатиятуллина Д. Д.<sup>1,2\*</sup>, Землянов А. В.<sup>1</sup>, Балохонов Р. Р.<sup>1</sup>, Утяганова В. Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
2/4, Академический проспект, Томск, 634055, Россия*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
36, проспект Ленина, Томск, 634050, Россия*

*[\\*gdiana@ispms.ru](mailto:*gdiana@ispms.ru)*

Аддитивные технологии позволяют создавать металлические изделия сложной формы, сокращая при этом время производства и снижая уровень потребления сырья по сравнению с традиционными технологиями [1]. Среди преимуществ аддитивного производства возможность получения материалов с заданными механическими свойствами для конкретных условий эксплуатации, что не всегда возможно с использованием традиционных методов. Эти преимущества делают аддитивное производство привлекательным для широкого круга отраслей промышленности, так и для фундаментальной и прикладной науки. Электронно-лучевое аддитивное производство (ЭЛАП) является одной из перспективных аддитивных технологий для получения высококачественных изделий с низкодефектной структурой [2, 3]. В настоящей работе проведено двухуровневое численное моделирование деформации и разрушения сплава AlSi12, изготовленного аддитивным послойным электронно-лучевым плавлением проволоки. Экспериментально методами оптической, электронной и просвечивающей микроскопии исследована микроструктура сплава. Установлено, что на масштабном уровне десятков микрометров наблюдается дендритная структура в эвтектическом каркасе (Уровень 1), а на более низком масштабном уровне порядка нескольких сотен нанометров материал эвтектики представляет собой классический дисперсно-упрочненный композит «алюминиевая матрица – частицы кремния» (Уровень 2). Таким образом, предлагается определять пластические свойства и характеристики разрушения на Уровне 2 и использовать их в качестве эффективных свойств эвтектического каркаса на Уровне 1. В рамках подхода многоуровневого моделирования структура аддитивных композиционных материалов учитывается в расчетах в явном виде. Динамические краевые задачи решаются с помощью программного пакета ABAQUS/Explicit методом конечных элементов. Используются изотропные модели упругопластического алюминия и упруго-хрупких пластин кремния с учетом разрушения при достижении критической величины накопленной пластической деформации и интенсивности напряжений, соответственно. Результаты моделирования показали, что индуцированные охлаждением после плавления материала остаточные напряжения снижают макроскопическую прочность материала при последующем растяжении. Разрушение аддитивного композита на Уровне 1 происходит в эвтектическом каркасе. Зарождается магистральная трещина, которая разделяет рассматриваемый объем материала на две части и распространяется под углом 60 градусов к направлению приложения механической нагрузки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00222, <https://rscf.ru/project/23-11-00222/>.

### *Литература*

1. N. Zhao, M. Parthasarathy, S. Patil, [et al]. Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications, *Journal of Manufacturing Systems*. 2023, V. 68, 368-375.
2. V. Utyaganova, A. Filippov, S. Tarasov. *Materials Characterization*. 2021, V. 172, 110867.
3. А.В. Землянов, Д.Д. Гатиятуллина, В.Р. Утяганова, Н.Н. Шамарин, С.Ю. Никонов, В.А. Романова, Р.Р. Балохонов. Особенности деформирования и разрушения эвтектики в композиционном аддитивном алюминиево-кремниевом сплаве, *Физическая мезомеханика*, 2023, Т. 26, № 4, 103–116.



## GRAIN-SCALE DEFORMATION MECHANISMS IN ADDITIVELY MANUFACTURED FCC POLYCRYSTALS

Romanova V. A.<sup>1</sup>, Balokhonov R. R.<sup>1</sup>, Lychagin D. V.<sup>2</sup>, Pisarev M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Strength Physics and Materials Science, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russia, [varvara@ispms.ru](mailto:varvara@ispms.ru), [rusy@ispms.ru](mailto:rusy@ispms.ru)*

<sup>2</sup>*National Research Tomsk State University, 36, pr. Lenina, Tomsk, 634050, Russia, [lychagindv@mail.ru](mailto:lychagindv@mail.ru)*

Oligocrystals provide a unique material for in-depth analysis of deformation mechanisms in metals and alloys [1]. In this paper, the deformation mechanisms in an aluminum bronze oligocrystal are investigated experimentally and numerically. An experimental sample containing several coarse columnar grains is produced by wire-feed electron-beam additive manufacturing [2]. Based on the experimental data, a crystal plasticity finite element model is built to consider realistic grain shape and orientations. This study involves a comprehensive analysis of experimental data, numerical results and analytical estimates to reveal the peculiarities of slip activation in oligocrystal grains under compression. Experimental and numerical findings have shown that along with slip systems with the highest Schmid factors, other slip systems are activated in most grains to accommodate their plastic deformation. To elucidate why the slip systems with non-maximal Schmid factors became active, we examined the stress fields within the grains. It was revealed that the stress state at the grain scale deviated from uniaxial. Finally, a detailed numerical analysis of strain rate dynamics demonstrated that plastic deformation in particular grains developed in the form of narrow fronts. These fronts periodically generated near the moving punch and subsequently propagated towards the opposite side of the sample. The study has shown that oligocrystal analysis provides valuable insights into the linkage between the intra- and intergrain deformation mechanisms with the overall material behavior.

The work was performed according to the Government research assignment for ISPMS SB RAS, project FWRW-2021-0002.

### *Литература*

1. V. Romanova et al. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2024, 12390, 10.22190/FUME231128002R
2. E.A. Kolubaev et al. *Physical Mesomechanics*, 2022, 25, 6, 479-491.

# ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИМПЛАНТАТОВ ИЗ ПОРИСТОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА И КОСТНЫХ ТКАНЕЙ ПОЗВОНКОВ ПРИ ЗАМЕЩЕНИИ МЕЖПОЗВОНОЧНОГО ДИСКА

Ветрова А. В., Чайковская Т. В.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
36, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия, [aniuta-vetrova@mail.ru](mailto:aniuta-vetrova@mail.ru), [kolmakova@ftf.tsu.ru](mailto:kolmakova@ftf.tsu.ru)*

Возрастные изменения позвоночника представляют собой процесс дегградации хрящевой и костной ткани сегментов и требуют замены их составляющих элементов: межпозвоночного диска, тела позвонка или всего сегмента [1]. В качестве материала для протезирования элементов позвоночника предлагается рассматривать пористый никелид титана, полученный методом саморапространяющегося высокотемпературного синтеза, поскольку данный материал обладает хорошей коррозионной стойкостью, высоким уровнем прочностных свойств, подобием механического поведения природным тканям при физиологических нагрузках и будет обеспечивать высокую биохимическую и биомеханическую совместимость [2].

В рамках данного исследования проводилась оценка долговечности и прочностных свойств пористых эндопротезов из никелида титана цилиндрической формы с пористостью 60-67 %, установленных в межпозвоночное пространство в случае полной замены межпозвоночного диска в сегменте позвоночника. Проводилась также оценка долговечности костных тканей, прилегающих к эндопротезу позвонков.

Расчеты напряженно-деформированного состояния сегмента шейного отдела позвоночника с эндопротезами разных размеров при наклоне головы вперед проводились в программном комплексе ANSYS с использованием метода конечных элементов. Варьировалась плотность губчатой костной ткани тел позвонков. Заданные нагрузки соответствовали физиологическим значениям [3].

Результаты компьютерного моделирования показали, что уменьшение плотности губчатой костной ткани тел позвонков в результате остеопороза существенно не влияет на характер распределения напряжений, а приводит к увеличению их значений. В результате проведенного исследования выявлено, что срок службы рассматриваемых эндопротезов составляет не менее 35 лет. По истечении срока службы эндопротезов усталостное разрушение может начаться преимущественно в наружных частях протеза, примыкающих к позвонкам сегмента. Установка данных пористых эндопротезов из никелида титана не повлечет за собой усталостное разрушение костных тканей позвонков сегмента в течение всей жизни человека.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 22-72-10037, <https://rscf.ru/project/22-72-10037/>*

## *Литература*

1. L.Scarcia, M.Pileggi, A.Camilli, A.Romi, A.Bartolo, F.Giubbolini, I.Valente, G.Garignano, F D'Argento., A. Pedicelli, et al. *J. Pers. Med.* 2022. 12. A. 1810.
2. J.M.Jani, M.Leary, A.Subic, M.A. Gibson *Materials and Design.* 2014. 56. pp.1078–1113
3. S. Hueston, M. Makola, I. Mabe, T. Goswami. *Human Musculoskeletal Biomechanics*, 2012. Ch. 6. P. 107–158.

# РАСЧЕТ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПОЛИМЕРНЫХ ТКАНЕВЫХ КОМПОЗИТОВ С ПОМОЩЬЮ ЛОКАЛЬНОГО ТРЁХМЕРНОГО АРМИРОВАНИЯ (ФЕЛТИНГА)

Форенталь Г. А.<sup>1</sup>, Сапожников С. Б.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет (НИУ), 76, пр. Ленина, г. Челябинск, 454080, Россия, [gforental@mail.ru](mailto:gforental@mail.ru)

<sup>2</sup>Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского, 1, ул. Жуковского, г. Жуковский, Московская область, 140180, Россия, [sapozhnikovsb@susu.ru](mailto:sapozhnikovsb@susu.ru)

Для трехмерного армирования композита использован фелтинг – пробивка пакета сухих преформ трехгранной иглой с зубринами. Целью было изучение влияния фелтинга на трансверсально-сдвиговые характеристики прочности композита из экспериментов по схемам DCB (метод двухконсольной балки) и ENF (метод трехточечного изгиба).

Оценка напряженного состояния у трещиноподобного дефекта проведена с позиции подходов, использующих осреднённые на некоторой базе напряжения [1,2] в предположении линейной упругости материала вплоть до разрушения. Расчет проводили с использованием МКЭ-пакета ANSYS Workbench. Полагали, что за развитие трещины (как концентратора напряжений) ответственен критерий прочности композита, который включает все компоненты напряжений, осреднённых на базе  $\lambda$ :

$$\left( \frac{\max \sigma_{x\lambda}}{X_t} \right)^2 + \left( \frac{\max \sigma_{z\lambda}}{Z_t} \right)^2 + \left( \frac{\max \tau_{xz\lambda}}{S} \right)^2 - \frac{\max \sigma_{x\lambda} \cdot \max \sigma_{z\lambda}}{X_t \cdot Z_t} \leq 1.$$

Данное условие важно для оценки нагрузки, при которой происходит скачкообразное увеличение длины трещины на величину  $\lambda$ . Здесь  $X_t$  и  $Z_t$  – пределы прочности в направлении X и Z, S – предел прочности на сдвиг в плоскости XZ.

Для получения расчётных зависимостей «нагрузка-перемещение» с помощью МКЭ характеристики прочности композита были получены с помощью обратного метода, при котором эти характеристики варьируются, и отыскивается их наилучшее сочетание (минимизация среднеквадратичного отклонения расчётных и экспериментальных перемещений при заданных нагрузках). При нагружении по схеме DCB были определены значения  $X_t=360$  МПа и  $Z_t=39$  МПа для образцов без фелтинга и  $X_t^*=270$  МПа и  $Z_t^*=46$  МПа для образцов с фелтингом. При нагружении по схеме ENF были определены значения  $S=77$  МПа (без фелтинга) и  $S^*=89$  МПа (с фелтингом). Экспериментальные и расчетные кривые приведены на рис. 1. Фелтинг увеличивает предел прочности на растяжение композита в направлении Z на ~18%, а предел прочности на сдвиг в плоскости XZ на ~16%.

Материал подготовлен при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение от 17 мая 2022 г. № 075-15-2022-1023).

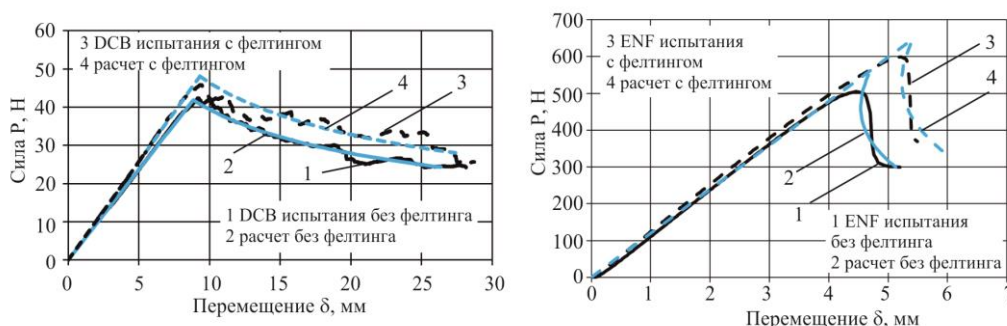


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные диаграммы «нагрузка-перемещение»

## Литература

1. H.T. Nguyen, A.A. Dönmez, Z.P. Bažant. *Extreme Mechanics Letters*. 2021;43(1):101141.
2. P. Maimi, E.V. Gonzalez, N. Gascons, L. Ripoll. *Applied mechanics reviews*. 2013;65(2):020803.

# ОЦЕНКА АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ НИКЕЛЯ\*

Богданов А. И.<sup>1</sup>, Кулевич В. П.<sup>1</sup>, Евчиц Р. Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет, 28, проспект Ленина, Волгоград, 400005, Россия, bogdanov@vstu.ru

В работе представлены результаты исследования процессов адгезионного/когезионного разрушения слоистых покрытий систем Ni-Al, Ni-Cr-Al и Ni-Cr-Fe-Al, полученных по технологии, разработанной в ВолгГТУ и включающей операции сварки взрывом, жидкостного алитирования и термообработки [1]. Исследования производили на базе микротвердомера ПМТ-3М. В качестве параметра, характеризующего когезионное разрушение покрытия, использовали критическое расстояние ( $L_k$ ) – расстояние от поверхности покрытия до начала момента его растрескивания.

Значение твердости при царапании, характеризующее истинное сопротивление разрушению, определяли по формуле [2]:

$$H=(0,3782 \times F)/b^2,$$

где  $F$  – сила вдавливания, Н,  $b$  – ширина царапины, мм.

Исследования показали, что при минимальной нагрузке 0,5 Н адгезионное разрушение покрытий отсутствует – трещины на границе «покрытие-подложка» не визуализируются. По границам царапины на всех покрытиях видны сколы, а на выходе индентора из покрытия образуются когезионные трещины, причем наиболее выражено в покрытиях систем Ni-Cr-Al и Ni-Cr-Fe-Al. Увеличение нагрузки на индентор до 2 Н приводит к образованию в покрытиях систем Ni-Cr-Al и Ni-Cr-Fe-Al мелких когезионных трещин по пути следования индентора. При этом растет критическое расстояние, где трещинообразование приводит к когезионному разрушению или, как в бинарной системе, происходит скалывание покрытия. Адгезионных трещин, по-прежнему, не наблюдалось. Царапание образцов с покрытиями при максимальной нагрузке 5 Н наряду с дальнейшим ростом  $L_k$  приводит к появлению адгезионных трещин в бинарных покрытиях и покрытиях системы Ni-Cr-Fe-Al. При этом катастрофического отслоения покрытия от подложки не происходит. Анализ характера изменения ширины царапины от прилагаемой нагрузки свидетельствует о близких механических характеристиках исследуемых покрытий. С ростом нагрузки происходит соразмерный рост ширины царапины, причем закон роста почти линейный. Рассчитанное среднее значение твердости царапанием, характеризующее истинное сопротивление разрыву, составило 800 МПа.

Таким образом, в системе «твердое покрытие - мягкая подложка» реализуется механизм так называемого вязкого разрушения, при котором отслоение и скалывание покрытий происходит только при очень больших нагрузках, или в случае слабой адгезии. Основными для данной системы являются механизмы когезионного разрушения.

\*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10246, <https://rscf.ru/project/21-79-10246/>

## Литература

1. Shmorgun V. G. et al. Microstructure and phase composition of diffusion coating formed in NiCr alloys by hot-dip aluminizing //Surfaces and Interfaces. – 2021. – Т. 23. – С. 100988.
2. ГОСТ 21318-75. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. – М. Изд-во стандартов. 1976. – 27 с.

# ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ИНЕРТНОМ ГАЗЕ (TIG) АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ (AL-ZN-MG-CU)-TiC

Спирина И. А.<sup>1</sup>, Смирнов А. С.<sup>1</sup>, Канакин В. С.<sup>1</sup>

*Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия, smirnov@imach.uran.ru*

Металлические композиты с матрицей на основе алюминия и его сплавов в последние десятилетия представляют особый интерес с научной и практической точек зрения и всё чаще находят применение в различных отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, автомобильную и электронную. Такое внимание обусловлено возможностью создания легких металлических материалов с уникальными механическими свойствами за счет сочетания преимуществ конструкционных сплавов с достоинствами наполнителей. Композиционные материалы обладают низкой плотностью, повышенной твердостью, прочностью, высокой удельной жесткостью, износостойкостью, повышенным модулем упругости, пониженным коэффициентом теплового расширения и высокой теплопроводностью, а также способны сохранять свои устойчивые свойства в широком диапазоне температур.

Большую часть изделий из металлических материалов производят, используя сварочные технологии в качестве основного способа сборки конструкции. Данное решение обуславливается экономической целесообразностью или технической невозможностью произвести деталь целиком с помощью литья или обработкой давлением. Одним из самых доступных способов сварки, обеспечивающих получение качественного сварного соединения, для дисперсно-упрочненных алюмоматричных композитов является дуговая сварка неплавящимся электродом в инертном газе (TIG) [1,2]. Текущая работа посвящена изучению сформированной микроструктуры сварного соединения металломатричных композитов с матрицей из алюминиевого сплава В95 и армирующими частицами карбида титана (TiC) с объемным содержанием от 1 до 10%. Данный композиционный материал был изготовлен жидкофазным методом путем введения армирующих частиц в расплав при включенной механической мешалке. Частицы карбида титана имели фракционный состав, соответствующий стандарту FEPA F800. По окончании смешивания частиц с расплавом, он был слит в предварительно нагретую изложницу до 350 °С. Затем из полученной отливки были нарезаны плоские заготовки, которые впоследствии сваривались встык без зазора и присадочного материала. Из полученных пластин вырезались образцы для металлографического исследования сформированной микроструктуры сварного соединения. Исследования проводили с помощью оптической микроскопии.

## *Литература*

1. Sivachidambaram P., Balachandar K. Optimization of pulsed current TIG welding parameters on Al-SiC metal matrix composite - An empirical approach // *Indian J. Sci. Technol.* 2015. Vol. 8, № 23.
2. Choudhary R. Multi Response Optimization of Tungsten Inert Gas (TIG) Welding of Al6063/15%SiCp Metal Matrix Composites // *J. Appl. Mech. Eng.* 2015. Vol. 04, № 01. P. 1–8.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАТАНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1545К

Никитина М. А., Песин А. М., Носов Л. В., Барышникова А. М., Песин И. А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 38, ул. Ленина, г. Магнитогорск, 455000, Россия, [mgurbich@yandex.ru](mailto:mgurbich@yandex.ru)

На сегодняшний день одной из тенденций развития космонавтики является переход на более экологически чистое топливо – жидкий водород. Температура жидкого водорода минус 253°С, не все алюминиевые сплавы и их сварные соединения работоспособны при данной температуре. Баки ракет представляют собой герметичные сварные конструкции. Специально для баков под жидкий водород учеными АО «Композит» и ОАО «ВИЛС» был разработан деформационный термически неупрочняемый свариваемый алюминиевый сплав системы алюминий-магний-скандий 1545К [1].

Одним из эффективных методов повышения прочностных характеристик сплавов системы алюминий-магний, является введение добавок скандия [2]. Однако добавка скандия значительно повышает стоимость полуфабрикатов, так как стоимость лигатуры Al-2%Sc достигает 50\$/кг. Сплав 1545К содержит 0,17-0,27%Sc, что сильно сказывается на стоимости полуфабрикатов, что в свою очередь значительно ограничивает возможность применения данного сплава в других отраслях промышленности. В настоящей работе рассмотрены методы оптимизации технологии изготовления катаных полуфабрикатов из сплава 1545К позволяющие сократить издержки при производстве полуфабрикатов и сделать применение сплава 1545К более доступным для различных отраслей промышленности. Одним из методов снижения стоимости полуфабрикатов, является оптимизации технологии прокатки за счет уменьшения издержек производства. Одним из методов является применение по мимо классической симметричной прокатки, асимметричную прокатку. Асимметричный вид прокатки позволяет получить более меклодисперстную структуру, чем классический вид прокатки за счет того, что при асимметричной прокатке в металле одновременно возникают высокие деформации сжатия и сдвига за счет противоположно направленных сил контактного трения, действующих на заготовку одновременно со стороны верхнего и нижнего валков, вращающихся с различными окружными скоростями. Асимметричная прокатка позволяет снизить усилие на стане, увеличить процент обжатия за один проход, сократить количество отжигов, тем самым сократить время производства катаных полуфабрикатов и издержек при их производстве [3].

Катаные полуфабрикаты толщиной 2 мм изготавливались по стандартной технологии, а также с применением асимметрии на уникальном лабораторно-промышленном стане ДУО 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А. П. Жилиева МГТУ им. Г. И. Носова». Асимметричная прокатка была применена как при горячей, так и при холодной прокатке. Асимметричная прокатка позволила значительно снизить усилие на проход, обжатия за один проход стали выше, чем при стандартной технологии. Полученные механические характеристики и исследование макроструктуры свидетельствуют о положительном влиянии асимметричной прокатки. Применение рассматриваемого подхода позволяет значительно сократить издержки при изготовлении полуфабрикатов при этом не снижая качество получаемых полуфабрикатов.

Благодарность: Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-02041, <http://rscf.ru/project/22-49-02041>.

## Литература

1. Ю.А. Филатов, В.И. Елагин, В.В. Захаров, Л.И. Панасюгина, Р.И. Доброжинская, А.А. Елисеев, Г. В. Додин, А.А. Звонков, С.А. Петроковский, В.П. Молочев. . Пат. 2343218 РФ, МПК С22С 21/08 Заявл. 06.04.2007; Оpubл. 10.01.2009. Бюл. № 1.
2. В.В. Телешов, М.Р. Газизов, В.В. Захаров, Е.Я. Капуткин, Технология легких сплавов 2016 №2 С. 50-65.
3. А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О. Д. Бирюкова, А.Е.Кожмякина// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2020. – Т. 20. No 3. – с. 81-96.

# МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ В95, АРМИРОВАННОЙ КАРБИДАМИ КРЕМНИЯ И ТИТАНА

Канакин В. С.<sup>1</sup>, Смирнов. А. С.<sup>1</sup>, Спирина И. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 620049, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

В результате развития техники и увеличения экологических требований в современном машиностроении возникла потребность в получении новых или модифицировании имеющихся конструкционных материалов для повышения уровня физико-механических свойств. В частности, для алюминиевых сплавов в последнее время используется легирование скандием (Sc) и цирконием (Zr), что увеличивает уровень предельных механических характеристик, но при этом существенно повышает стоимость готового изделия. Применение композиционных материалов, упрочненных дисперсными карбидными частицами, может повысить экономическую эффективность, а также увеличить уровень физико-механических и функциональных свойств до требуемого для деталей и конструкций. Поскольку свойства металлических материалов во многом определяются его структурой и микроструктурой, то для получения композитов с необходимыми механическими свойствами необходимо исследование формирования структуры и микроструктуры у новых композиционных материалов в зависимости от типа упрочнителя и его объемного содержания. Целью данной работы было сравнить влияние карбида титана (TiC) и карбида кремния (SiC) на формирование структуры и микроструктуры, а также механических свойств в металломатричных дисперсно-упрочненных композитах с алюминиевой матрицей В95.

В работе композиционный материал изготавливался по жидкофазной технологии путем замешивания в расплав сплава В95 армирующих частиц SiC и TiC, имеющих фракционный состав FERA F800. Для синтеза композиционных материалов была использована специально разработанная мешалка из оксида алюминия с лопастями сложной формы, позволяющими ввести частицы в расплав с последующим их равномерным распределением. По окончании перемешивания расплав с частицами был слит в предварительно нагретую цилиндрическую изложницу из нержавеющей стали диаметром 56 мм и высотой 150 мм. Затем алюмоматричные композиты были гомогенизированы при температуре 470 °С в течение 24 часов. По такой методике были синтезированы композиты с одинаковым объемным содержанием частиц карбида титана и карбида кремния.

После гомогенизации композитов из них были изготовлены шлифы для проведения металлографического анализа и измерения твердости. Сформированную зеренную микроструктуру в композитах изучали методом дифракции отраженных электронов (EBSD) с помощью электронного микроскопа VEGA II TESCAN с приставкой OXFORD HKL Nordlys F+. Твердость алюмоматричных композитов была определена методом Бринелля.

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Школина Д. И.<sup>1</sup>, Шляхтенков С. П.<sup>3</sup>, Бехер С. А.<sup>2</sup>, Бобров А. Л.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «СГУПС», 191, Д.Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, РФ, *dashashkolina@mail.ru*  
<sup>2,3,4</sup>ФГБОУ ВО «СГУПС»

Распространенным способом получения сложно-профильных заготовок деталей машин и механизмов является литье. Повышение качества изделий, уменьшение количества браков и производственных дефектов является основной задачей литейного производства. Технологические дефекты являются следствием нарушения технологии изготовления, температурных режимов на всех этапах производства и неудовлетворительного состояния производственного оборудования. Создание эффективной системы контроля качества позволяет осуществить своевременное воздействие на уровень качества продукции, предупреждать возможные несоответствия, обеспечивать их оперативное выявление с наименьшими затратами. Оценка состояния изготовленного изделия осуществляется методами неразрушающего контроля и направлена на выявление дефектов, связанных с нарушением технологии изготовления [1, 2].

**Целью работы** является анализ качества изготовления сложно-профильных литых изделий с использованием совокупности методов неразрушающего и разрушающего контроля.

В работе исследовалась выборка изделий, изготовленных из стали 40 Л по технологии литья по выплавляемым моделям и забракованных по результатам магнитопорошкового контроля. После проведения МПК детали подвергались вихретоковому контролю для оценки глубины залегания дефектов и исследованию разрушающими методами для определения характера и истинных размеров дефектов.

Магнитопорошковый контроль проводился с помощью намагничивающего устройства МД-12ПШ с применением флюоресцентного магнитного индикатора LY 1500. Оценка глубины залегания дефектов проводилась вихретоковым методом в зоне индикаторного рисунка, полученного по результатам МПК. Вихретоковый контроль проводился дефектоскопом ВЕКТОР–60Д в комплекте с вихретоковым преобразователем ПВР-1 на частоте 100 кГц в статическом режиме амплитудно-фазовым методом. Глубина трещины  $h$  оценивалась по градуировочным характеристикам, предварительно полученным с помощью образцов с реальными трещинами разной глубины.

С целью верификации результатов магнитопорошкового и вихретокового контроля и для определения фактических размеров дефектов выполнен разрез образца в зоне повреждения. Фрактографическое исследование позволило определить истинные размеры и определить характер дефекта.

Проведение магнитопорошкового контроля на этапе выходного контроля деталей позволяет выявлять дефекты типа нарушения сплошности металла, что предоставляет возможность проведения своевременной корректировки технологического процесса изготовления для уменьшения количества производственного брака. Для оценки глубины дефектов проведен вихретоковый контроль, а для подтверждения и оценки точности определения размеров – подтверждающий разрушающий контроль, который позволил верифицировать результаты магнитопорошкового и вихретокового контролей, у всех забракованных деталей в изломах обнаружены характерные технологические дефекты глубиной до 4 мм.

### *Литература*

1. А. Л. Бобров, С. А. Бехер, С. П. Шляхтенков. Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 3(43). С. 10-15.
2. Г. С. Шелихов, Ю. А. Глазков, П. Е. Клейзер. Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 3(285). С. 34-44.



## ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ И ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Сенаева Е. И., Пугачева Н. Б., Макаров А. В.

*Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, д. 34, улица Комсомольская, город Екатеринбург, 620049, Россия,  
e-mail: [katty14-12@yandex.ru](mailto:katty14-12@yandex.ru)*

В последнее время в научной литературе очень широко обсуждается проблема соединения разнородных материалов для облегчения веса конструкций, а также экономической выгоды готовых изделий. Обширными исследованиями доказана необходимость применения соединений из хромоникелевых сталей с титановыми сплавами, для их надежного соединения исследованиями доказано, что целесообразно применять медную вставку. Основное преимущество использования именно этой пластины в том, что медь плавится на более низких температурах, нежели сталь и титановый сплав, это позволяет контролировать вклад титана и железа в формировании сварочной ванны.

Хорошие результаты достигнуты при сварке CO<sub>2</sub>-лазером со скоростью 1м/мин при мощности 2,4 кВт и заглублинии фокуса на 3 мм в поверхность листов, прочность по этому режиму является максимальной и составляет 515 МПа. Научный интерес представляет исследование получившихся зон в этом сварном соединении. Условно их разделили на 7: 4 диффузионные зоны (ДЗ), 2 зоны термического влияния (ЗТВ) и непосредственно зона переплава (ЗП).

В каждой зоне различный фазовый и химический составы. ЗТВ-1 в стали включает в себя ДЗ-1. В ДЗ-1 все процессы происходят без расплавления материалов, зоны получились за счет диффузии меди из расплава. Отметим, что хромоникелевая сталь обладает высокой теплопроводностью и ЗТВ-1 остается нагретой достаточно короткое время, за которое зерна не успевают заметно вырасти (20-25 мкм, при размере зерна в основе 15 мкм, при ширине зоны термического влияния 0,4 мм). В ДЗ-2 образуется уже другая, отличная от ДЗ-1, структура, в формировании которой участвует расплавленный материал. Установлено, что в ДЗ-2 формируется трёхфазная структура: аустенит + кристаллы мартенсита (5 об. %) + частицы Cu<sub>4</sub>Ti размерами 10 нм. В ЗП образуется механическая смесь двух структурных составляющих: 1) твердый раствор на основе меди + частицы (Fe,Cr)<sub>2</sub>Ti размерами 10 нм и глобулярные области аустенита с мартенситными кристаллитами (10 об. %) и частицами Cu<sub>4</sub>Ti размерами 10 нм. Титан имеет более низкие показатели теплопроводности, нежели сталь, поэтому ЗТВ-2 более длительное время остается нагретой. Именно этим обусловлена более широкая ЗТВ-2 (0,8 мм) и более значительное увеличение альфа зерен от 20 мкм в основе Ti до 68 мкм в ЗТВ-2. ДЗ-3 представляет собой слой расплавленного титана, легированный медью, не успевший принять участие в конвективном перемешивании расплавов сварочной ванны. Химический состав и структура этой зоны соответствует эвтектоидной смеси (Ti<sub>2</sub>Cu+TiCu), причем частицы Ti<sub>2</sub>Cu образуются в результате последовательно протекающих эвтектического  $L_{Cu} \rightarrow \beta_1Ti + Ti_2Cu$  и эвтектоидного  $\beta_1Ti \rightarrow \beta_2Ti + Ti_2Cu$  превращений. Частицы Ti<sub>2</sub>Cu имеют размеры от 2 до 5 мкм и содержат больше меди по сравнению с частицами Ti<sub>2</sub>Cu размерами 0,1 - 0,5 мкм. Расположение частиц Ti<sub>2</sub>Cu и TiCu в виде сплошной узкой прослойки в ДЗ-3 могут привести к хрупкому разрушению сварного шва при испытаниях на растяжение.

Исследования проведены в соответствие с государственным заданием по теме № 124020700063-3.

# ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННОМ СИЛУМИНЕ НА МИКРОУРОВНЕ

Бородина А.<sup>1,2</sup>, Дымнич Е. М.<sup>2</sup>, Романова В. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, 36, проспект Ленина, Томск, 634050, Россия, [anzhelika.borodina@ispms.ru](mailto:anzhelika.borodina@ispms.ru)*

<sup>2</sup> *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2/4, Академический проспект, Томск, 634055, Россия, [anzhelika.borodina@ispms.ru](mailto:anzhelika.borodina@ispms.ru)*

В работе представлены результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) в аддитивно изготовленном силумине на микроуровне. Экспериментальные данные свидетельствуют о ключевой роли дендритной структуры зерен в формировании деформационного отклика аддитивно изготовленных силуминов [1, 2]. Анализ проводился в рамках подходов микромеханики на моделях дендритной структуры, построенных на основе экспериментальных данных просвечивающей электронной микроскопии и элементного картирования. Для разработанных моделей ячеистых дендритных структур была выполнена серия конечно-элементных расчетов для исследования влияния объемной доли кремния в эвтектическом каркасе на локальные и эффективные характеристики НДС.

Проанализирована роль эвтектического каркаса в распределении нагрузки между алюминиевой и кремниевой фазой, оценены эффективные упругие модули для моделей с различным содержанием кремния. Было выявлено, что содержание кремния влияет на места концентрации напряжений. В структуре с содержанием кремния 9 вес.% первичный алюминий испытывает более высокий уровень напряжений в эвтектике по сравнению с материалом в ячейках. Противоположная картина наблюдается в структуре с 20 вес.% кремниевых частиц. Сравнение полученных эффективных модулей показало согласие с экспериментальными результатами наноиндентирования.

Проведен сравнительный анализ НДС во фрагментах микроструктуры исходных и отожженных образцов с одинаковым содержанием кремния и выявлена роль эвтектического каркаса в снижении пластичности силуминов, изготовленных методом селективного лазерного плавления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00600, <https://rscf.ru/project/20-19-00600/>

## *Литература*

1. Z. Jiang, J. Sun, F. Berto, X. Wang, G. Qian, *Phys Mesomech* 2023, 26, p. 367–390.
2. V. Romanova, R. Balokhonov, A. Borodina, O. Zinovieva, E. Dymnich, S. Fortuna, A. Shugurov, *Thin-Walled Structures*, 2024, 196, 111464. [DOI: 10.1016/j.tws.2023.111464](https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111464)

## THE EFFECT OF SCANNING STRATEGY ON GRAIN STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF PBF-LB STAINLESS STEEL 316L

Emelianova E. S.<sup>1</sup>, Pisarev M.<sup>1</sup>, Zinovieva O.<sup>2</sup>, Zinoviev A.<sup>2</sup>, Romanova V. A.<sup>1</sup>, Balokhonov R. R.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*School of Engineering and Technology, University of New South Wales Canberra, Campbell, 2612, ACT, Australia*

This work aims at investigating of the influence of the scan strategy on the grain-scale stresses and mechanical properties of austenitic stainless steel 316L produced by laser-based powder bed fusion (PBF-LB) using an integrated process-structure-property approach. The heat transfer during the virtual PBF-LB process is simulated within the concept of a local steady-state temperature field in a moving region using finite differences. Cellular automata approximate the grain structure evolution in solidification. After the virtual manufacture, steel samples are subjected to uniaxial tension in different directions, which is described using the finite element method. Special attention is paid to the material's internal structure – the grain morphology and texture – and its effects on the macroscale and local mechanical behavior. The analysis

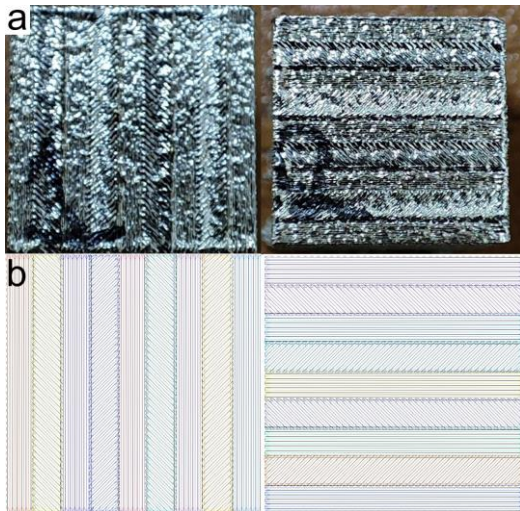


Fig. 1. As-printed specimens (a) obtained using different scanning strategies (b)

of calculation results revealed that for uni- and bidirectional scanning strategies, with all other process parameters being the same, the Young's moduli have the least values when tension is applied along the scan direction as compared with loading along the build and transverse directions. Commonly for both models, when loaded along the scan direction, the tensile strains preceding plastic deformation are larger and the effective stresses are lower. The unidirectionally printed steel shows a more substantial anisotropy of the deformation behavior as compared to the steel virtually printed with the bidirectional strategy.

Based on the calculation results, the experimental specimens were printed with scanning strategies differing within one specimen. The top surfaces of the resultant structures are shown in Fig. 1a. The laser direction changed corresponding to the scheme shown in Fig. 1b. The

experimental tests on uniaxial tension will be performed to study the deformation behavior.

*This work is supported by Russian Science Foundation through the grant No 20-19-00600, <https://rscf.ru/project/20-19-00600/>.*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ЦЕПОЧКУ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛИ МАРКИ 20Х13

Песин А. М., Пустовойтов Д. О., Цатурянц М. С., Носов Л. В.,  
Песин И. А., Бахчеев А. Д.

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ

Анализируя современное состояние рынка РФ, следует отметить, что в настоящее время до 90% нержавеющей стали поступает из-за рубежа, что создает серьезные проблемы в обеспечении промышленности этим важным стратегическим материалом. Сложности производства не позволяют поставить на поток производство стали в больших количествах. Для решения этой проблемы, необходимо искать новые методы обработки металла, которые могли бы эффективно справиться с производственными задачами. Одним из перспективных направлений в этой области является асимметричная прокатка [1].

В рамках проведенных исследований были изучены возможности холодной асимметричной прокатки с целью сокращения количества проходов для достижения требуемой толщины проката. Основным материалом для исследований были выбраны заготовки из нержавеющей стали размерами 120x51x2,82 мм марки "20Х13". Эксперименты проводились на уникальном прокатном стане ДУО 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А. П. Жилиева МГТУ им. Г. И. Носова». В ходе экспериментов были опробованы различные режимы асимметричной прокатки с разными скоростями верхнего и нижнего валков, а также комбинации симметричной и асимметричной прокатки.

Для сравнения был взят за основу режим листового проката стали с «Ашинского металлургического завода»: 3→2,6→2,2→2→1,8→1,7→ отжиг и травление → 1,7 → 1,4→1,2→1→0,9 → 0,8мм. Исследования показали, что с помощью асимметричной прокатки удалось сократить количество проходов с 10 до 5, а также убрать этапы термической обработки и травления, и достичь при этом необходимой толщины проката. Наилучший результат показал образец с комбинированием асимметричной и симметричной прокатки. Этот результат представляет собой значительный технологический прогресс и может иметь важное значение для увеличения внутреннего производства нержавеющей стали.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-02041, <https://rscf.ru/project/22-49-02041>

## Литература

1. Песин, А.М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О. Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2020. – Т. 20. No 3. – с. 81-96.
2. Pustovoytov, D. Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) rolling of light alloys: A Review / D. Pustovoytov, A. Pesin, P. Tandon// Metals 2021. – 11 (956). – p. 1-46.

# МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ СПЛАВА Ti6Al4V С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ Cu, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ АДДИТИВНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Николаева А. В., Зыкова А. П.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2/4, пр. Академический, г. Томск, 634055, Россия*

*e-mail: [nikolaeva@ispms.ru](mailto:nikolaeva@ispms.ru), [zykovaap@mail.ru](mailto:zykovaap@mail.ru)*

Титановые сплавы широко используются для производства деталей аэрокосмической промышленности из-за их низкой плотности, высокой вязкости разрушения, а также превосходной усталостной и коррозионной стойкости [1]. Получение данных сплавов аддитивными технологиями открыло новые возможности для изготовления изделий сложной геометрии в короткие сроки для авиа- и ракетно-космической промышленности, а также биомедицины.

Однако, во время аддитивного производства титановых сплавов происходит эпитаксиальный рост крупных первичных  $\beta$ -зерен, что приводит к анизотропии механических свойств и отрицательно влияет на эксплуатационные характеристики изделия [2]. Измельчения зерен можно добиться путем легирования титанового сплава различными элементами, такими как Mo, Nb, Cu и Fe. Повышение механических характеристик в титановых сплавах за счет легирования может быть обусловлено такими механизмами упрочнения как: зернограничное, дисперсионное, дислокационное и твердорастворное. Различные механизмы упрочнения вносят неодинаковый вклад в предел текучести сплавов и зависят от содержания легирующего элемента в сплаве. Целью настоящей работы являлась оценка вкладов различных механизмов упрочнения в повышение предела текучести сплава Ti6Al4V с разным содержанием Cu.

На экспериментальной установке электронно-лучевого аддитивного производства металлических изделий в ИФПМ СО РАН были выращены заготовки в виде стенок Ti6Al4V с концентрацией Cu 0,6, 1,6, 6 и 9,7 вес.%. В вакуумной камере на подложке из технически чистого титана VT1-0, закрепленной на подвижном водоохлаждаемом столе, электронным лучом формировали ванну расплава. В нее подавали проволоки из титанового сплава Ti6Al4V и меди (M1). Испытания на одноосное растяжение проводились на универсальной испытательной машине УТС 110М-100.

Показано, что введение Cu в титановый сплав способствует эффективному уменьшению размера зерен и переходу от столбчатой структуры к столбчато-равноосной и полностью равноосной структуре. Установлено, что микроструктура Ti6Al4V-Cu состоит из первичных  $\beta$ -зерен, колоний  $\alpha/\beta$  пластин и дисперсных частиц Ti<sub>2</sub>Cu. На основании анализа структуры и механических характеристик сплавов Ti6Al4V-Cu установлено, что измельчение структуры и выделение частиц Ti<sub>2</sub>Cu обеспечило повышение предела текучести и предела прочности по сравнению со сплавом Ti6Al4V, полученным ЭЛАП без добавления Cu.

В настоящей работе впервые проведен количественный анализ механизмов упрочнения сплава Ti6Al4V с разным содержанием Cu, полученного электронно-лучевым аддитивным производством. Установлено, что зернограничное упрочнение является основным вкладом в повышение механических характеристик сплава Ti6Al4V с содержанием Cu 0,6, 1,6, 6 и 9,7 вес.%. Значения дисперсионного и твердорастворного упрочнения соизмеримы и вносят меньший вклад в повышение механических характеристик, по сравнению с зернограничным упрочнением.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2024-0001.*

## *Литература*

1. Z. Liu, B. He, T. Lyu, Y. Zou. *JOM*. 2021. 73, 1804–1818
2. F. Wang, S. Williams, M. Rush. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011. 57, 597–603.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПРЕТЕРПЕВШИХ ВЗРЫВНОЕ ОБЖАТИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШАРОВ**

Юсупов Д. Т.<sup>1</sup>, Гармашев А. Ю.<sup>1</sup>, Кучко Д. П.<sup>1</sup>, Дегтярев А. А.<sup>1</sup>, Петровцев А. В.<sup>1</sup>,  
Шалковский Д. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно Исследовательский Институт Технической Физики имени академика Е.И. Забабахина», Снежинск, Россия.*

Определение остаточной тепловой энергии с помощью твердотельного калориметра, выполненное непосредственно после взрывного обжатия шаров из конструкционных материалов, представляет научный и практический интерес с точки зрения изучения структурных и прочностных свойств материала шара в условиях кумуляции энергии, различных способов ввода энергии в исследуемый образец, а также учета уровней диссипативных потерь. Работа проведена для проверки и калибровки уравнений состояния и модели сдвиговой и откольной прочности.

В работе приведены постановка и экспериментальные результаты взрывных экспериментов с шарами из различных конструкционных материалов: аустенитной стали 12Х18Н10Т; стали 30ХГСА в состоянии поставки и после закалки; стали Ст.3; меди М1. Показаны результаты влияния количества точек инициирования на ввод энергии в шар, влияние типа материала на поглощение энергии при одинаковом энергоотводе. Проиллюстрировано влияние фазовых переходов и режимов нагружения на остаточную энергию для различных материалов.

## **EXPERIMENTAL RESULTS OF EVALUATING RESIDUAL ENERGY OF EXPLOSIVE-COMPACTED METAL SPHERES**

Yusupov D. T.<sup>1</sup>, Garmashev A. Yu.<sup>1</sup>, Kuchko D. P.<sup>1</sup>, Degryaryov A. A.<sup>1</sup>, Petrovtsev A. V.<sup>1</sup>,  
Shalkovskiy D. M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia.*

Residual heat energy evaluation using a solid-state calorimeter, performed immediately after explosive compaction of spheres made of structure materials, is of scientific and practical interest for purposes of investigating structural and strength properties of the sphere material under energy cumulation conditions, of studying different ways of energy input into the test sample, and of accounting dissipation losses. The objective of work was to test and calibrate the equations of state and their kinetic models of shear and spallation strength.

The paper presents the setup and results of explosive experiments with spheres made of different structure materials, in particular, 12Kh18N10T austenitic steel; 30KhGSA as-delivered and hardened steel; steel grade 3; and M1 cooper. The effect of the number of initiation points on energy input into the sphere is shown as well as the material type effect on energy absorption at the same energy input. The effect of phase transitions and loading conditions on residual energy is illustrated for different metal materials

## РАЗРАБОТКА РЕСТОРАТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТОМАТОЛОГИИ

Панфилов П. Е.<sup>1,2</sup>, Коровин Р. Д.<sup>1</sup>, Кабанова А. В.<sup>1</sup>, Меженев М. Е.<sup>1,2</sup>, Зайцев Д. В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

<sup>2</sup> *Уральский государственный горный университет, Екатеринбург*

Ресторативные материалы для стоматологии должны удовлетворять требованиям: обладать высокой биосовместимостью с организмом человека; их прочностные свойства должны обеспечивать функционирование организма, но быть ниже, чем у твердых тканей человека; подаваться механической обработке и быть доступными для массового производства. Биоминерал скорлупа куриных яиц, состоящий из 95% карбоната кальция и 5% биоорганических соединений, отвечает этим условиям и, поэтому, может рассматриваться в качестве ресторативного материала для стоматологии. В докладе обсуждается деформационное поведение образцов, как вырезанных из скорлупы куриных яиц, так и приготовленных из нее путем компактирования с разными связующими. Образцы из скорлупы в форме пластин вырезали алмазной дисковой пилой вдоль главной оси яйца. Их испытывали на воздухе и в воде по схемам 3-х точечного изгиба и среза, включая in-situ изгиб на оптическом микроскопе. На часть таких образцов наносили покрытия из полимерных пломбных материалов, используемых в клинической практике, для оценки когезионной прочности пломбных материалов. Из измельченной в порошок куриной скорлупы прессовали образцы в форме цилиндров с разным соотношением диаметра к высоте и с разными связующими (клеи: БФ-6, ПВА и силикатный). Компактированные образцы испытывали на воздухе по схемам одноосного сжатия и диаметрального сжатия – бразильского теста. Рабочие поверхности образцов до и после испытаний изучали при помощи металлографического микроскопа. Во всех случаях, инженерные деформационные кривые можно было аппроксимировать прямой линией. Анализ деформационного поведения образцов, приготовленных из скорлупы куриных яиц, показал, что при минимальном уровне растягивающих напряжений (одноосное сжатие и срез) модельные материалы на макроскопическом масштабе демонстрируют вязкое поведение – деформация до начала разрушения лежит в пределах 5-10%, как на воздухе, так и в воде. При приложении растягивающих нагрузок, тип их поведения на макроскопическом масштабе становится хрупким – деформация до начала разрушения всегда менее 1%. Увеличивая содержание вязкого связующего в компактированном материале более, чем на порядок, деформационное поведение образцов менялось с присущего горным породам, на поведение подобное эластомерам. При этом трещины, по росту которых можно получить информацию о деформационном поведении материала на микроскопическом масштабе, демонстрировали вязкое поведение независимо от схемы приложения нагрузки. Так при изгибе в металлографическом микроскопе трещины в скорлупе можно было подрастить, увеличивая стрелу прогиба, без распада образца на части. На основании полученных результатов можно заключить: (1) тип поведения скорлупы на макроскопическом уровне определяется долей растягивающих напряжений в схеме деформирования и меняется от хрупкого при изгибе и диаметральном сжатии до вязкого при сжатии и срезе; (2) на микроскопическом масштабе, поведение модельных материалов аттестовано как вязкое при всех схемах нагружения; (3) влияние водной среды не приводило к качественным изменениям в поведении модельных материалов; (4) варьируя содержание вязкого связующего можно менять деформационное поведение компактированной скорлупы от поведения эмали до поведения дентина зубов человека.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-29-00253).

# ДИСКРЕТНАЯ УЛЬТРАСТРУЙНАЯ ДИАГНОСТИКА ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Галиновский А. Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 5, с.1,  
2-я Бауманская, Москва, 105005, Россия, a\_galinovskiy@bmstu.ru

В течение последних 10 лет на кафедре СМ-12 МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся исследования различных вариантов применения высокоскоростных струй жидкостей различного состава (ультраструй) для решения задач оценки совокупности качественных и эксплуатационных показателей материалов и изделий, применяемых, например, для оценки качества лакокрасочных покрытий на изделиях, подверженных воздействию абразивных частиц [1-2].

В ходе последних работ была создана модель воздействия абразивно-жидкостной струи на образец материала и проведена верификация полученных результатов. В ходе экспериментального исследования, определяющего количество точек взаимодействия частиц абразивно-жидкостной ультраструи с лакокрасочным покрытием, была решена задача оценки распределения точек контакта абразивных частиц с поверхностью образца. Следует отметить, что для оценки точности данного метода он сравнивался с экспериментом, основанным на методе ультраструйной диагностики [3].

Проведение натурного эксперимента может быть сопряжено с организационно-техническими сложностями и отсутствием возможностей фиксации ряда информативных параметров, таких как, например, скорость течения ультраструи, особенность движения абразива и др. Альтернативой может являться разработка математических моделей данных процессов, причем здесь можно говорить, как о выводе обобщённых формул и зависимостей, описывающих физические процессы ультраструйной диагностики, так и о применении метода конечных элементов [4].

Для моделирования воздействия ультраструи, на языке C++ была написана программа, оформленная в виде консольного приложения, работа с которым осуществляется по соответствующему алгоритму [5]. В разработанном приложении пользователем задаётся: радиус диска, скорость подачи, частота вращения, расход абразива, диаметр пятна контакта гидроструи (в мм) или угол расхождения струи, а также расстояние от сопла до поверхности образца.

Далее был проведен сравнительный анализ постановочного эксперимента и данные вероятностного моделирования. Рассчитан коэффициент корреляции значений координат соударений, который составил  $R=0,97$ .

Таким образом, получено доказательство того, что разработанная модель распределения точек взаимодействия высокоскоростных частиц по поверхности образца позволяет с достаточной точностью предсказывать распределение их координат по площади рассматриваемой поверхности.

Применение модели позволит устанавливать необходимое значение концентрации абразива и другие технологические параметры, что позволит сократить время, затраченное на подготовку экспериментов по диагностике качества лакокрасочных покрытий.

## Литература

1. М.И. Абашин, А.Л. Галиновский, А.С. Проваторов, М.В. Хафизов. Вестник рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2014, №4 (31), 9-16
2. И.В. Деревич, А.Л. Галиновский, А.С. Вышегородцева, А.К. Клочков, М.В. Клюшников. Технология металлов. 2022, №11, 48-58
3. А.Л. Галиновский, А.А. Михайлов, Д.А. Мартысюк, А.И. Плохих, С.В. Бочкарев. Все материалы Энциклопедический справочник. 2023, №8, 30-36
4. Голубев Е.С., Мугла Д.Р., Барзов А.А., Сысоев Н.Н. Труды МАИ. 2016, Выпуск № 101, 4-5
5. А.Л. Галиновский, А.А. Михайлов, А.С. Вышегородцева, И.К. Виноградова, Мартысюк Д. А. Все материалы Энциклопедический справочник. 2024, №1, 19-25.



## **ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

Плехов О. А., Бартоломей А. Л., Вшивков А. Н., Гачегова Е. А., Манухина К. Д.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, 1, ул. Академика Королева, Пермь, 614018,  
Российская Федерация, roa@icmm.ru*

Хорошо известно, что создание остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое материала приводит к изменению характера процесса зарождения и распространения усталостных трещин. Лазерная ударная проковка (LSP) является одним из наиболее эффективных методов создания значительных остаточных сжимающих напряжений в металлах на более 1 миллиметра. Реализация метода требует использования импульсного лазера высокой энергии в сочетании с решением комплекса физических и механических проблем. Во время процесса LSP металлическая поверхность обрабатываемой детали подвергается воздействию наносекундных высокоэнергетических лазерных импульсов, которые индуцируют в ней упругопластические волны. Распространение упругопластических волн в материале обрабатываемой детали приводит пластическому деформированию поверхностного слоя и, как следствие, возникновению благоприятных остаточных напряжений. Остаточные напряжения, создаваемые LSP, могут достигать амплитуды до -1 ГПа.

В данной работе теоретически и экспериментально исследуется влияние LSP на формирование остаточных напряжений в образцах титана (BT6), алюминия (D16) и меди (M1T). Теоретическое описание эффекта лазерного воздействия на вещество включает решение нескольких связанных физическо-механических задач. Первая задача - испарение материала (образование плазменного факела). Плазма расширяясь генерирует волну сжатия в обрабатываемом материале с амплитудой, значительно превышающей предел упругости Гюгонио. Вторая задача - распространение упругопластической волны в материале с характерной длительностью в несколько десятков наносекунд. Третья задача - расчёт самоуравновешенного поля остаточных напряжений в образце, вызванного пластически деформированным поверхностным слоем. Четвертая задача заключается в моделировании влияния остаточных напряжений поля на процессы зарождения и распространения усталостных трещин. Каждая из задач требует отдельного научного исследования.

На данном этапе работы проведено детальное исследование зависимости максимального давления и длительности импульса напряжения от параметров электромагнитного воздействия для всех исследованных материалов. Параметры импульса определяются по данным прямого измерения скорости свободной поверхности на основе фотонного доплеровского велосиметра (PDV). PDV позволяет измерять скорость свободной поверхности мишени в диапазоне от 5 м/с до 1380 м/с с точностью до 2 м/с. Конструкция позволяет проводить одновременно измерение в четырёх точках на поверхности образца с частотой дискретизации 10 Гбит/с. В результате проведённой работы создана база экспериментальных данных для верификации численных моделей распространения упругопластических волн при наносекундном электромагнитном воздействии и определены оптимальные параметры для реализации технологии LSP для исследованных материалов.

Дополнительно работе приводятся примеры подбора оптимальных режимов обработки для образцов с концентраторами напряжения, изготовленных из титана OT4-0, и гладких образцов из титана BT1-0. Показано, что оптимальный режим обработки повышает усталостный ресурс образца с концентратором напряжения в 8 раз.

# ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА МЕЖСЛОЙНЫХ ГРАНИЦАХ В СЛОИСТОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

Крючков Д. И.<sup>1,2</sup>, Каманцев И. С.<sup>1</sup>, Швейкин В. П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, kru4koff@bk.ru

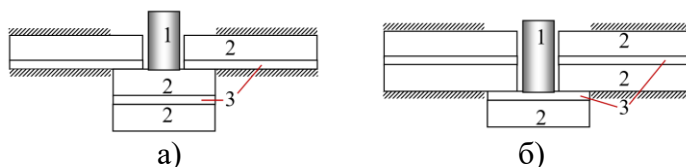
<sup>2</sup> УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002

Одним из типовых видов повреждения слоистых материалов при деформации является расслоение по границе соединения. Оценка прочностных характеристик зависит от многих факторов, таких как схема испытания, конфигурация и размеры образца. Поэтому выявление закономерностей разрушения на границах многослойных металлических материалов представляет собой достаточно сложную и актуальную задачу.

Для изучения поведения композитных структур и определения условий инициализации и роста расслоения находят применение подходы, основанные на расчете удельной работы расслоения. Одним из таких подходов является метод виртуального закрытия трещин (VCCT) [1]. Особенностью метода VCCT является то, что рост трещин происходит по заранее определённой пути, а именно по межфазным или межслойным границам.

Целью работы является: оценка напряженно-деформированного состояния на межслойных границах в слоистом композиционном материале.

Прототипом образца для вычислительного эксперимента послужил прямоугольный образец, полученный методом горячей пакетной прокатки. Образец состоит из 5 слоев, с чередующимися слоями из сплава 12X18H10T толщиной 2,5 мм и стали 09Г2С толщиной 1 мм. Общая толщина образца составила 9,5 мм, а ширина 5 мм. Рассматриваются две конфигурации образцов (рис. 1). Для реализации деформации образца задавалось перемещение пуансона и фиксировалось усилие  $P$ . Решение осуществлялось в плоской постановке (плоско-напряженном состоянии). Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния проведен при значениях критической скорости высвобождения упругой энергии  $G_{IC}$  равной 10 и 40 кДж/м<sup>2</sup>.



1 – пуансон, 2 – слой из 12X18H10T, 3 – слой из 09Г2С

Рис. 1. Схема образцов и схема испытания: а) – тип I, б) – тип II

В результате были построены и проанализированы графики распределения компонентов тензора напряжений для каждого слоя вдоль границы расслоения для каждой конфигурации. Выявлено, что при использовании образцов с конфигурацией I типа трещина образуется ближе к зашпечленным концам, а при конфигурации II типа ближе к пуансону. В месте начала расслоения в конфигурации I максимальные значения имеют компоненты напряжений вдоль действия нагрузки, в то время как для конфигурации II максимальные напряжения преобладают вдоль границы расслоения.

## Литература

1. Krueger R. *Applied Mechanics Reviews*. – 2004. – 57(2). – pp. 109-143. <https://doi.org/10.1115/1.1595677>
2. Johannes Reiner, Reza Vaziri 8.4 *Structural Analysis of Composites With Finite Element Codes: An Overview of Commonly Used Computational Methods / Editor(s): Peter W.R. Beaumont, Carl H. Zweben // Comprehensive Composite Materials II, Elsevier, 2018, Pages 61-84, ISBN 9780081005347, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10050-5.*
3. R. Krueger, 1 - *The virtual crack closure technique for modeling interlaminar failure and delamination in advanced composite materials, Editor(s): Pedro P. Camanho, Stephen R. Hallett, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Numerical Modelling of Failure in Advanced Composite Materials, Woodhead Publishing, 2015, Pages 3-53, ISBN 9780081003329, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100332-9.00001-3.*

# ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕКСТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПУТЕМ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Урцев Н. В.<sup>1</sup>, Кузьмина А. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, 28, Мира, Екатеринбург, 620002, kuzari02@yandex.ru

В настоящее время для изготовления магистральных газопроводов высокого давления по технологии контролируемой термомеханической обработки КТМО (thermomechanical controlled processing – ТМСП) используются высокопрочные низкоуглеродистые микролегированные стали типа 05Г2МБ. Возникающая при КТМО микроструктурная и текстурная неоднородность металла приводит к анизотропии механических свойств в листе. Настоящая работа посвящена изучению влияния микроструктуры и кристаллографической текстуры, сформированных при КТМО, на деформационное поведение образцов стали 05Г2МБ при растяжении.

В качестве варьируемых параметров использовали температуру чистовой горячей прокатки (выше и ниже температуры  $A_3 \sim 840^\circ\text{C}$ ) и интенсивность последеформационного охлаждения листов ( $\sim 30\text{--}45$  град/с). Образцы для изучения механических свойств вырезали из середины листов в трех направлениях: вдоль направления прокатки (НП-образцы), под углом  $45^\circ$  к НП (45-образцы) и поперек НП (ПН-образцы).

С помощью методов РЭМ показано, что структура стали 05Г2МБ после контролируемой термомеханической обработки по различным режимам состоит из зерен преимущественно бейнитной  $\alpha$ -фазы размером  $\sim 3,0\text{--}3,5$  мкм. При прокатке ниже температуры  $A_3$  в структуре стали наблюдаются вытянутые вдоль направления прокатки ферритные зерна, кристаллографическая текстура которых близка к текстуре бейнита, образованного при фазовом  $\gamma\text{--}\alpha$ -превращении.

Показано, что на равномерной стадии растяжения кристаллографическая текстура не оказывает значительного влияния на предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , временное сопротивление  $\sigma_b$  и равномерное относительное удлинение  $\delta_r$ . При всех исследованных режимах прокатки уровень прочностных свойств ПН-образцов ( $\sigma_{0,2} = 530\text{--}545$  МПа,  $\sigma_b = 625\text{--}685$  МПа) на  $25\text{--}45$  МПа превышает аналогичную величину для НП-образцов и, чуть более, для 45-образцов. При этом величина равномерного удлинения ( $\delta_r = 6,6\text{--}10,2$  %) слабо чувствительна к режиму обработки и направлению вырезки образцов, как и относительное удлинение  $\delta$ , разброс которого составляет  $\sim 5,5$  %. Подобное инерционное поведение наблюдается на равномерной стадии растяжения не только для выделенных механических характеристик ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ), но и для равномерного удлинения (сужения)  $\delta_r$  ( $\psi_r$ ), и соотношения  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ .

Обнаружено, что кристаллографическая текстура оказывает существенное влияние на деформационное поведение на сосредоточенной стадии деформации, предшествующей разрушению. Это проявляется в виде разного по величине и форме излома образца после разрушения: «симметричная» текстура приводит к более равноосной форме поверхности разрушения. Совместный анализ частотного распределения фактора Тейлора ( $M$ ) и текстуры вдоль разных направлений позволил заключить, что малая величина относительного сужения  $\psi$  образца в плоскости прокатки (как в направлении прокатки, так и в перпендикулярном направлении) обусловлена большой долей трудно деформируемых зерен с «жесткой» ориентировкой ( $M \sim 3,20\text{--}3,70$ ). В то же время сопротивление образца действию напряжений вдоль направления нормали (НН) к плоскости прокатки снижается вследствие увеличения доли более «мягких» ориентировок с  $M \leq 3,0$ .

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00615, <https://rscf.ru/project/23-29-00615/>. Испытания проведены с использованием оборудования ЦКП УрФУ.*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОЙ ПЛАСТИНЫ

Ширяев А. А.<sup>1</sup>, Карманов В. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «ОДК-Авиадвигатель», 93, Комсомольский пр-т, Пермь, 614990, Россия,  
alex\_sh\_23-1@mail.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «ПНИПУ», 29, Комсомольский пр-т, Пермь, 614990, Россия

Элементами конструкции авиадвигателей, в значительной мере определяющими их эксплуатационные характеристики, являются рабочие лопатки. Лопатки в процессе эксплуатации подвержены повреждениям от попаданий посторонних предметов, что приводит к появлению забоин по кромкам и перу [1], уменьшению предела выносливости до 50 %.

Для повышения стойкости лопаток к повреждениям применяются различные методы упрочнения, в т. ч. лазерная ударная обработка (ЛУО) [2]. В работе [3] показано, что глубина сжимающих ОН при ЛУО превосходит (> 0,3 мм) серийно применяемые методы упрочнения. Для подбора параметров ЛУО целесообразна разработка математической модели процесса с целью уменьшения натуральных экспериментов и трудозатрат.

Моделирование ЛУО включало два этапа. На первом этапе проводилось моделирование распространения упругопластических волн на основе определяющего соотношения Джонсона-Кука [4], на втором – осуществлялся статический расчет распределения остаточных напряжений.

В качестве модели – пластина толщиной 2 мм из титанового сплава. Форма лазерного пятна – квадрат со стороной 1-3 мм. Прогнозируемые результаты моделирования находились в разумном согласии с экспериментальными данными.

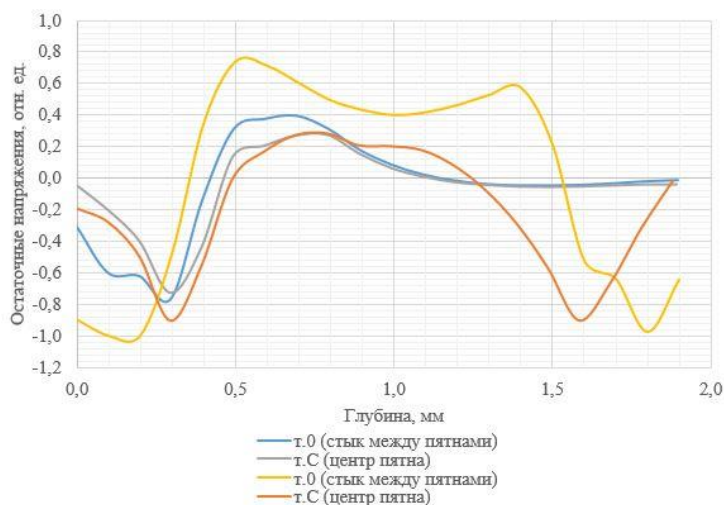


Рис. 1. Распределение ОН по глубине при 2х сторонней ЛУО при 1м проходе.  
Пунктирной линией указан режим с односторонней обработкой  
сжимающих ОН на противоположной стороне.

По результатам моделирования получены следующие выводы:

1) Применение ЛУО без перекрытия приводит к неоднородному распределению сжимающих ОН по глубине. Стыковые зоны между пятнами лазерного импульса обладают минимальными сжимающими ОН. Для равномерного распределения ОН по глубине рекомендуется проводить ЛУО с перекрытием 50 %.

2) Применение ЛУО с обеих сторон пластины приводит к уменьшению профилей сжимающих ОН, а также способствует нивелированию околонулевых

## Литература

1. А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. М: Машиностроение, 2008. Т.2. 368 с.; с.56
2. И.А. Новиков, Ю.А. Ножницкий, С.А. Шibaев Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор). Авиационные двигатели. – 2022. №2. С.59–82. DOI: 10.54349/26586061\_2022\_1\_59
3. А.А. Ширяев, И.Г. Габов, А.С. Миленин, Д. Ф. Таиров Сравнение методов упрочнения на предел выносливости лопаток из титанового сплава. Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2023. №4. С.109-117.
4. А.Е. Бузюкин, И.Л. Гладкий, Е.И. Краус Определение параметров модели Джонсона-Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов. Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56. № 2. С. 188-195.

# ПОВРЕЖДЕННОСТЬ АДДИТИВНОЙ СТАЛИ 316L В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО И ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Белецкий Е. Н., Левин В. П., Синев И. О., Ботвина Л. Р.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,  
49, Ленинский пр., Москва, 199334, Россия, enbel@mail.ru*

Использование технологии селективного лазерного плавления для изготовления сталей и сплавов из металлического порошка находит широкое применение в различных областях техники [1]. Для обнаружения дефектов и оценки поврежденности этих материалов необходимо использование различных методов неразрушающего контроля (НК).

Образцы были получены из металлопорошковой композиции аустенитной стали 316L на установке селективного лазерного плавления MeltMaster3D-550 [2]. Испытания проведены на сервогидравлической установке BISS Nano в условиях статического нагружения (при скорости деформации 2 мм/мин) и циклического нагружения с частотой нагружения 20 Гц, асимметрией цикла  $R = 0,1$ . Исследование поврежденности с оценкой площади поврежденной поверхности  $S^*$ , средней длины усталостной трещины  $l$  выполнены с использованием микроскопа Neophot 32. Ультразвуковые параметры НК (скорость распространения  $V$  и коэффициент затухания  $\alpha$  продольных ультразвуковых волн) измерены лазерным оптико-акустическим методом с помощью дефектоскопа УДЛ-2М. Для измерения вихретокового параметра и электросопротивления  $R$  использовали дефектоскоп ВД-90НП и микроомметр ТС-2, соответственно.

По результатам испытаний в условиях статического нагружения было установлено:

- существенное увеличение параметров  $V$ ,  $H_{ec}$ ,  $S^*$  наблюдается при достижении относительной деформаций  $\varepsilon > 0,4$ ;
- линейное изменение вихретокового параметра  $H_{ec}$  от поврежденности образца  $S^*$ , что позволяет оценить остаточный ресурс материала.

По результатам испытаний в условиях циклического нагружения было установлено [2]:

- методами НК обнаружена смена механизма разрушения: от многоочагового к одноочаговому разрушению (при напряжении  $\sigma = 250$  МПа). При этом напряжении происходит скачкообразное изменение  $V$ ,  $\alpha$ ,  $R$  и критической длины усталостной трещины, наблюдаемой на поверхности излома образца;
- стадийность в изменении длины трещины соответствует стадийности в изменении параметров НК;
- средняя длина малых трещин  $l$  на стадии стабильного роста линейно зависит от относительного числа циклов нагружения, как при низкой, так и при высокой амплитуде напряжения.
- по измерениям зависимости коэффициента затухания  $\alpha$  продольных ультразвуковых волн от частоты оценен размер границ ванн расплава.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №23-19-00784).

## *Литература*

1. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals / Acta Mater. 2016. Vol. 117. P. 371–392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
2. Ботвина Л.Р., Белецкий Е.Н., Левин В.П., Юдин А.В. Изменение характеристик неразрушающего контроля при циклическом нагружении стали 316l аддитивного производства / Металлы. 2024. №2. С. 64-71. DOI: 10.31857/S0869573324026471

# ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ МАРТЕНСИТНЫХ ВАРИАНТОВ В МАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПОЛЯХ В ФЕРРОМАГНИТНОМ СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Роговой А. А.<sup>1</sup>, Столбова О. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, 1, ул. Академика Королёва, г. Пермь, 614018, Россия, rogovoy@icmm.ru, sos@icmm.ru

Ферромагнитные сплавы с памятью формы (ФСДФ), например сплавы Гейслера  $Ni_2MnGa$ , обладают способностью производить значительную деформацию (до 6-10%) в мартенситном (низкотемпературном) состоянии за счёт переориентации мартенситных вариантов под действием умеренного магнитного поля. Варианты, выгодно расположенные по отношению к приложенному магнитному полю, растут за счёт невыгодно ориентированных вариантов [1]. Переориентация (раздвойникование сдвойникового варианта мартенсита) может происходить также при приложении усилий. Максимальное значение деформации, вызванной переориентацией мартенситных вариантов, определяется собственной деформацией исходной кубической решетки при мартенситном переходе.

В данной работе строится микромеханическая модель поведения ФСДФ, которая описывает структурный переход, связанный с раздвойникованием вариантов мартенсита (мезоэлементов) под действием магнитного и/или силового полей. Динамика магнитного процесса описывается уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта. Используя процедуру Галеркина, построены вариационные уравнения, соответствующие дифференциальным соотношениям магнитной задачи, что позволило на порядок снизить требования к гладкости искомого решения [2]. Для описания кинематики процесса образования двойников используется условие совместности Адамара [3]. Раздвойникование наступает при достижении касательными усилиями, возникающими от магнитного и силового полей на поверхностях сдвига, определенной величины. Задача сводится к частному случаю моментной теории упругости, когда действует массовый магнитный момент, но нет моментного напряжения. Тензор напряжений при этом несимметричен и состоит из двух частей: симметричной, зависящей только от деформаций, и несимметричной, зависящей только от магнитного поля. Для симметричной части используется определяющее соотношение для анизотропного материала, имеющего одну ось симметрии четвертого порядка и две оси симметрии второго порядка, при малых деформациях.

Результаты, полученные с помощью описанной модели, сравнивались с результатами, представленными в экспериментальных работах [4, 5]. Рассматривался процесс переориентации одного варианта мартенсита в другой, происходящий при приложении внешнего магнитного поля при различных значениях сжимающих усилий. Определены касательные и нормальные усилия в плоскостях сдвига при приложении внешнего магнитного поля и сжимающего усилия в момент переориентации варианта мартенсита. Наблюдается хорошее соответствие кривой намагничивания, построенной по результатам расчета, и осевой деформаций с имеющимися экспериментальными данными.

## Литература

1. А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, Т. Такаги и др. Успехи физ. Наук. 2003, Т. 173, № 6, 577–607.
2. А.А. Роговой, О.С. Столбова, О.В. Столбов. ПМТФ. 2021, Т. 62, № 5, 195–207.
3. А.А. Rogovoy, O.S. Stolbova. Mech. Adv. Mater. Struct. 2024, V. 31, N. 2, 387–406.
4. O. Heczko, L. Straka. J. Appl. Phys. 2003, V. 94, N. 11, 7139–7143.
5. O. Heczko. J. Magn. Magn. Mater. 2005, V. 290–291, 787–794.

# МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИТОВ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕЧАТИ

Волкова О. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 4, М. Харитоньевский пер., Москва, 101000, Россия, sklemina97@yandex.ru

3D-печать – универсальная технология, которая позволяет изготавливать композиты с неоднородной структурой армирования, используя непрерывные и криволинейные траектории волокон. Она становится особенно актуальной для быстрого создания прототипов и разработки композитных изделий с нестандартными структурами армирования, а также позволяет экономить время и ресурсы [1-3]. Благодаря постоянным усилиям в совершенствовании аддитивных технологий и аппаратной разработке 3D-принтеров постоянно расширяется ассортимент материалов для 3D-печати, что приводит к расширению сферы применения композитов. Этот прогресс открывает новые возможности и перспективы для производства и создания продуктов, которые раньше нельзя было реализовать ранее разработанными методами производства.

При 3D-печати композитов с криволинейной траекторией волокон требуется набор точек, описывающих данную траекторию, и по которым от точки к точке передвигается сопло 3D-принтера. В работе разработана методика построения точек для траектории с разнообразными кривизнами при соблюдении заданной точности. Выбор расстояния между точками определяется заданной погрешностью, которую можно определить из отношения  $h/R$  (рис.1), где  $R$  – радиус кривизны траектории, а  $h$  – расстояние между моделируемой траекторией и описываемой с помощью ряда точек.

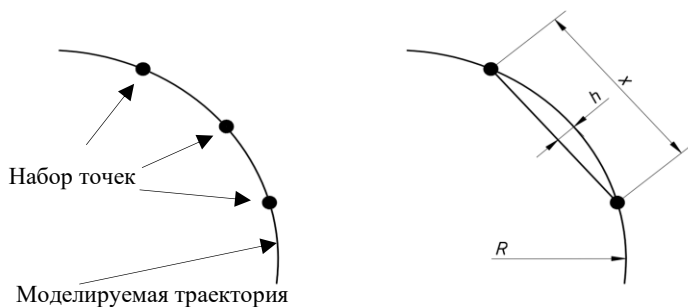


Рис. 1. Нахождение радиуса кривизны по трем точкам

удается соблюсти баланс между скоростью печати и кривизной траектории, что приводит к повышению скорости печати композитов при приемлемом их качестве. Данная методика улучшит набор данных для G-кода и позволит наилучшим образом реализовать свойства композитных материалов для изготовления различных конструкций.

**Финансовая поддержка.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00318 (Гибридные биоподобные композитные структуры переменной жёсткости как альтернатива квазиизотропным материалам), <https://rscf.ru/project/23-23-00318/>.

## Литература

1. Huan Jiang, Arif M. Abdullah, Yuchen Ding, Christopher Chung, Martin L. Dunn, Kai Yu. 3D Printing of continuous fiber composites using two-stage UV curable resin. *Materials Horizons*. 2023, Vol.10, 5508-5520.
2. Ping Cheng, Kui Wang, Antoine Le Duigou, Jiachen Liu, Zhixiang Liu, Yong Peng, Said Ahzi. A novel dual-nozzle 3D printing method for continuous fiber reinforced composite cellular structures. *Composites Communications*. 2023, Vol.37, 1-5.
3. Mark A. Skylar-Scott, Jochen Mueller, Claas W. Visser, Jennifer A. Lewis. Voxelated soft matter via multimaterial multinozzle 3D printing. 2019, Vol.575, 330-335.

# ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ СРЕДСТВАМИ ТЕНЗОМЕТРИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВИ И МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Бехер С. А., Выплавень В. С., Попков А. А., Гуляев М. А., Шляхтенков С. П.

*Сибирский государственный университет путей сообщения, 191, Дуси Ковальчук,  
Новосибирск, 630049, behers@mail*

На транспорте, в машиностроении и строительстве широко используются разъемные соединения, неподвижность которых обеспечивается силами трения: прессовые и тепловые соединения колец с валами и осями, болтовые соединения конструкций. Силы трения между элементами соединений возникают под действием остаточных упругих напряжений и описываются законом Амонтона-Кулона. При тепловой и прессовой посадках уровень упругих напряжений определяется разностью диаметров деталей, а в болтовых соединениях – моментом силы затяжки.

Подвижность соединений является достаточно распространенным дефектом, который в конечном итоге приводит к отказу, аварии или крушению конструкции [1]. Приборы и методы неразрушающего контроля прочности соединений с натягом в настоящее время отсутствуют. Диагностика таких узлов в эксплуатации проводится после их полного или частичного демонтажа при визуальном осмотре, измерении геометрических или механических величин.

Целью работы является определение закономерностей изменения распределения деформаций в соединениях с натягом при локальном тепловом и механическом воздействии и разработка способов неразрушающего контроля их прочности. Идея работы заключается в зависимости поверхностных деформации элементов соединений с натягом от напряжений трения на сопряженных поверхностях при наличии «проскальзывания», что может быть использовано для оценки предельных значений напряжений трения.

Экспериментальные исследования проводились с использованием быстродействующего тензометрического комплекса «Динамика-3» (номер в Государственном реестре 66938-17) и оптико-поляризационного датчика деформаций [2], обеспечивающего измерение относительных деформаций на базе 60 мм с погрешностью не более  $0,4 \cdot 10^{-4}$  (погрешность напряжений по стали не более 0,08 МПа). Для испытаний специально подготовлены прессовые соединения колец подшипников с валами с усилиями запрессовки от 3,7 до 10,5 кН, болтовые соединения стальных пластин с усилиями затяжки до 120 Н·м. Тепловое нагружение объектов контроля осуществлялось латунным цилиндром, предварительно нагретым до 200 °С, механическое – на прессе. Моделирование для определения критериев нелинейности деформаций и выбора способов нагружения проводилось методом конечных элементов в условиях квазистатического приближения, когда скорость распространения деформаций существенно превышает скорость теплового потока.

Экспериментально и методами математического моделирования определена связь параметров зависимости деформаций от времени с параметрами прочности соединения: усилиями запрессовки и моментом затяжки. Установлены требования разделения зон воздействия на объект и измерения деформаций, экспериментально показана возможность такого разделения для колец подшипников и болтовых соединений пластин. Обнаружена связь максимума и градиента деформаций с прочностью соединения с коэффициентом корреляции 0,97. В результате экспериментов установлена немонотонность скорости деформирования, вызванная дискретностью проскальзывания сопряженных поверхностей соединений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10110, <https://rscf.ru/project/23-29-10110/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

## *Литература*

1. Allal Bedlaoui, Hamid Boutoutaou. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023, V. 128, P. 2407-2418.
2. В.Н. Федоринин, С.А. Бехер, В.С. Выплавень [и др.]. *Автометрия*. 2023, Т. 59, С. 33-42.



# ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО ОБЪЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА СОСТАВА $ZrHfTiAlCoNiCu$ , ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Насенник И. Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, 20, проспект Карла Маркса, Новосибирск, 630073, Россия, nasennik.2017@corp.nstu.ru

Одним из основных направлений исследований в области конструкционного материаловедения на сегодняшний день являются многокомпонентные сплавы. Среди них особое внимание научного сообщества привлекают высокоэнтропийные сплавы, которые состоят из нескольких компонентов, взятых в равных (или приблизительно равных) пропорциях. Одним из наиболее перспективных направлений исследования многокомпонентных сплавов являются объёмные металлические стёкла. До недавнего времени данные направления (высокоэнтропийные сплавы и объёмные металлические стёкла), преимущественно развивались независимо друг от друга, однако относительно недавно были предложены высокоэнтропийные сплавы систем  $TiZrCuNiBe$ ,  $PdPtCuNiP$ ,  $TiZrHfCuNiBe$ ,  $SrCaYbMgZn$  и другие, склонные к аморфизации в условиях высокоскоростного охлаждения [1].

Данный класс материалов, обладает несколькими весомыми преимуществами в сравнении с классическими сплавами. Так, например, отсутствие кристаллической структуры приводит к исчезновению эффекта межкристаллитной коррозии, что значительно повышает срок работы данных материалов в условиях агрессивной внешней среды. А высокие показатели твердости способствуют повышению показателя износостойкости.

В работе проводились исследования композиционного материала  $Al-Zr_{35}Hf_{17.5}Ti_{5.5}Al_{12.5}Co_{7.5}Ni_{12}Cu_{10}$ , полученного методом искрового спекания при давлении 40 МПа. Высокоэнтропийное объёмное металлическое стекло состава  $Zr_{35}Hf_{17.5}Ti_{5.5}Al_{12.5}Co_{7.5}Ni_{12}Cu_{10}$  [2], получалось методом литья вакуумным всасыванием в аргонно-дуговой печи. Диаметр стержня составлял 3 мм.

После получения композиционного материала, были проведены дюротметрические испытания, а также испытания на сжатие и трехточечный изгиб с целью определения характера изменения механических свойств в процессе деформации. Кроме того, проводились фрактографические исследования поверхностей разрушения на растровом электронном микроскопе.

## Литература

1. H.Y. Ding, Yang Shao, Pan Gong, Li Jinfeng, Kefu Yao. A senary  $TiZrHfCuNiBe$  high entropy bulk metallic glass with large glass-forming ability // *Materials letters*. – 2014. – Т. 125. – С. 151-153. DOI:10.1016/j.matlet.2014.03.185
2. А. С. Макаров, Е. В. Гончарова, Г. В. Афонин, Ц. Ч. Цзиао, Н. П. Кобелев, В. А. Хоник. Расчет температурной зависимости нерелаксированного модуля сдвига высокоэнтропийных объёмных аморфных сплавов на основе калориметрических данных // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2020. – Т. 111. – №. 10. – С. 691-696. DOI: 10.31857/S1234567820100080.

## ВИБРАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ МОСТА «ВЛЮБЛЕННЫХ» В ТЮМЕНИ. ВТОРОЙ ЭТАП

Муратов К. Р.<sup>1</sup>, Лихачев Д. А.<sup>1</sup>, Соколов Р. А.<sup>1</sup>, Осинцева М. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, 38, ул. Володарского, Тюмень, 625000, Россия,  
[muratows@mail.ru](mailto:muratows@mail.ru)

Представлены результаты второго этапа исследований спектров поперечных колебаний стальных канатов (вантов) моста «Влюбленных» (рис. 1) в городе Тюмень. Первые результаты исследований были ранее представлены на предыдущей конференции МРДМК-2023. Мост держится на 20 стальных канатах, которые парами размещены слева и справа от полотна и перекинуты через пилон.

Стальные канаты моста подвергались удару резиновой киянкой так, чтобы колебания происходили в вертикальной плоскости. Спектрограмму регистрировали виброанализатором СД-21. По этим данным согласно разработанной нами методике [1] найдены значения силы натяжения канатов и изгибной жесткости по обе стороны от пилона. Распределение сил натяжения  $F$  канатов было вполне ожидаемым: вблизи опор усилия малые (160 кН), в средней части большие (800 кН). Значения изгибной жесткости  $EI$  оказались в диапазоне 125-153 кПа·м<sup>4</sup>, причем внутри каждой четверки канатов значения отличались слабо. При этом значения на их береговой и речной концах отличались. Это навело на мысль о точности значений длин канатов, величину которых мы определяли по фотографии. Изгибная жесткость  $EI$  при ее нахождении из экспериментальных коэффициентов пропорциональна четвертой степени длины каната. Погрешность длины в 5% приведет к 21% погрешности изгибной жесткости. К сожалению, определить с большей точностью значения длин возможности не было.



Рис. 1. Пешеходный мост «Влюбленных» в городе Тюмень

Общеизвестно, что условием стоячей волны на струне является равенство ее длины целому числу полуволн. Это условие было решено использовать для нахождения длины каната: определить ширину перовой пучности и умножить на их количество. Перемещая точку регистрации вибраций и измеряя лазерным дальномером удаленность этих точек от зажима канатов были получены значения их длин. Однако они оказались большими, чем полученные ранее. Причем обосновать расхождение погрешностями измерений нельзя. Здесь мы обратили внимание на характер крепления каната, которое представляет собой скорее жесткую заделку, чем шарнирное соединение. Это диктует в свою очередь дополнительное граничное условие, которое нам удалось учесть и сделать обобщение на промежуточные состояния зажимов в виде коэффициента  $C$ , который принимает значения от нуля (для жесткой заделки) до единицы (для шарнирного соединения). Учет этой особенности позволил обосновать расхождения расчетных значений длин канатов, а кроме того, открыл новый канал диагностической информации о состоянии каната в зажиме. Предположим, что крепление каната в виде жесткой заделки подвергается коррозионному разрушению внутри зажима. В этом случае коэффициент  $C$  должен возрасти и периодически определяя его экспериментально можно выявлять коррозию в креплении.

Работа выполнена при поддержке Национального проекта «Наука и университеты» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FEWN-2024-0005)

### Литература

1. К. Р. Муратов, В. Ф. Новиков, С. М. Кулак [и др.] Дефектоскопия. 2023, № 2, 16-23.

## РЕЗУЛЬТАТЫ КРУГОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ НОВОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ПОРОГОВЫХ УСЛОВИЙ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Сундер Р.

*BISS Labs, ITW-India (P) Ltd, г. Бангалор, Индия*

Существующие методы для оценки пороговых условий роста усталостной трещины не в состоянии избежать явление закрытия трещины, особенно при асимметрии цикла ниже 0,7. Частичное закрытие трещины при пороговых условиях приводит к завышенной оценке  $\Delta K_{th}$ . Это в свою очередь не позволяет конструкторам пользоваться справочными данными по  $\Delta K_{th}$  для расчета остаточной долговечности деталей и элементов конструкций с начальными дефектами. Такие дефекты а также короткие трещины, исходящие от концентраторов не склонны проявлять закрытие даже при сжимающих нагрузках.

Новый метод испытания на  $\Delta K_{th}$  избегает закрытие трещины при пороговых условиях. Его принятие ASTM в качестве стандарта требует проверки воспроизводимости метода статистически достоверным числом независимых лабораторий и на нескольких материалах. В предлагаемом докладе описывается сам метод а также результаты только что завершенных круговых испытаний, проведенных 14-ю лабораториями в Индии, РФ и США.

## ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ЗАДЕЛКИ НИТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПЕЧАТАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Власов Д. Д., Плугатарь Т. П., Поляков А. Э., Татусь Н. А.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, д.4,  
Малый Харитоньевский переулок, Москва, 101000, Российская Федерация*

[nikalet@mail.ru](mailto:nikalet@mail.ru)

**Аннотация.** В докладе приведены результаты экспериментально-теоретического исследования, направленного на изучение свойств поверхности раздела нить–матрица в композитах, полученных с помощью 3D печати. Цель работы состоит в определении зависимости механических характеристик соединения нить - полимерная матрица от длины заделки нити. Испытания проводились на образцах с различной длиной «заделки» единичной нити в массив полимерной матрицы. Для оценки возникающих в процессе нагружения полей перемещений на поверхности образца применялся метод корреляции цифровых изображений (КЦИ). Показаны характерные поля деформаций при вытягивании единичной нити из массива полимерной матрицы. Картины полей перемещений пересчитывались в деформации на поверхности образца, после чего проводилась оценка влияния длины заделки нити на распределение напряжений. Экспериментально определялась длина нити, при которой несущая способность композита реализуется эффективнее и нагрузка близка к предельной для самой нити. На основе экспериментальных данных была рассчитана минимальная эффективная длина «заделки» нити при изготовлении композитных элементов конструкции аддитивными методами.

**Ключевые слова:** пластики, армированные волокнами, вытягивание нити, адгезионная прочность, эффективная длина

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ МОДУЛЯ СДВИГА ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Поляков А. Э., Татусь Н. А., Власов Д. Д.

Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, 4, Малый Харитоньевский переулок, Москва, 101000, Россия, apadd@mail.ru, nikalet@mail.ru, danila\_vlasov\_98@mail.ru

Единственный стандартизованный метод определения внутрислойного модуля сдвига полимерных композитов – кручение ортотропной квадратной пластины (рис. 1). Особенность его в том, что для этого метода испытаний достаточно сложно подготовить образец, поскольку требуется строго ортогональная ориентация армирующих волокон, что весьма затруднительно сделать при ручной выкладке. Интересно испытать на четырехточечное кручение круглую пластину и попытаться найти корреляцию результатов со стандартным кручением квадратной.

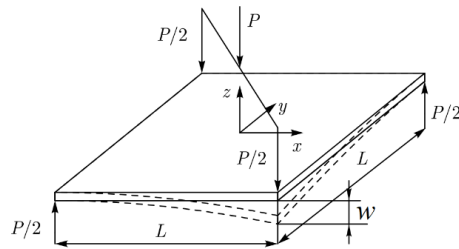


Рис. 1. Схема кручения квадратной пластины

Связь деформаций и напряжений в двумерной анизотропной системе можно описать уравнениями Войгта [1]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{16}\tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= a_{21}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{26}\tau_{xy} \\ \gamma_{xy} &= a_{61}\sigma_x + a_{62}\sigma_y + a_{66}\tau_{xy}\end{aligned}\quad (1)$$

Рассматривается частный случай чистого кручения пластины под действием момента  $M_{xy}$ , а также учитывается то, что материал ортотропен:  $a_{61}=0$ ;  $a_{62}=0$ . Принимая гипотезы модели Кирхгова-Лява имеем

$$\gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \quad (2)$$

откуда для срединной плоскости ( $z=h/2$ ) прогиб равен:

$$w = \frac{\tau_{0,xy}}{hG_{xy}} \quad (3)$$

где  $\tau_0 = \frac{6M_{xy}}{Lh^2}$  для прямоугольного сечения.

Сосредоточенные нагрузки  $P/2$  на каждом углу, действующие, как показано на рисунке 1, создают крутящий момент  $M_{xy}$  вдоль каждой стороны, равный  $PL/4$ . Тогда из (3) выводится:

$$G_{xy} = \frac{3 PL^2}{4 wh^3} \quad (4)$$

Получается, что вывод аналитических зависимостей для круглой пластины весьма громоздкая задача. Переменное поперечное сечение такого образца усложняет получение связи сдвигающих напряжений и крутящего момента (3). А составить уравнения равновесия на границе круглой поверхности не представляется возможным. Поэтому ставится задача получения эмпирической зависимости на основе численного моделирования.

## Литература

1. Voigt W. *Lehrbuch der Kristallphysik*. B.G. Teubner, 1910, 964.
2. Полилов А.Н., Татусь Н.А. *Биомеханика прочности волокнистых композитов*, ФИЗМАТЛИТ, 2018, 328.
3. Тарнапольский Ю.М., Кинцис Т.Я. *Методы статических испытаний армированных пластиков*, Химия, 1981, 272.

# МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНОГО ПОЛИМЕРА

Русаков С. В.<sup>1</sup>, Рахманов А. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, 15, ул. Букирева, г. Пермь, 614068, Российская Федерация, e-mail: [alx.rakhmanov@gmail.com](mailto:alx.rakhmanov@gmail.com)

В настоящее время актуальной является задача создания полезного объёма в космическом пространстве. Для решения данной задачи перспективным является подход, заключающийся в использовании разворачиваемых модулей, доставляемых на космическую станцию в сложенном виде, и приобретающих эксплуатационные габаритные характеристики непосредственно на орбите, в частности, применение отверждаемого композитного материала на основе эпоксидных смол [1] в качестве внешнего слоя такого модуля. В работе [2] предложена модель для исследования такого процесса, представляющая совместное описание для кинетической [3] и диффузионной [4] составляющей процесса. При этом параметры модели  $\alpha_{ep}$ ,  $\alpha_{am}$  требуют дополнительной идентификации на основе экспериментальных данных.

Будем рассматривать коэффициенты уноса  $\alpha_{ep}$ ,  $\alpha_{am}$  в модели [2] как функции новых эффективных параметров  $z^{ep}$ ,  $z^{am}$ ,  $p^{ep}$ ,  $p^{am}$ :

$$\alpha_{ep} = \frac{1}{2} \operatorname{Erfc} \left( \sqrt{z^{ep} \left( \frac{\eta(\psi(x,t))}{\eta_0} \right)^{p^{ep}}} \right), \alpha_{am} = \frac{1}{2} \operatorname{Erfc} \left( \sqrt{z^{am} \left( \frac{\eta(\psi(x,t))}{\eta_0} \right)^{p^{am}}} \right).$$

Здесь  $\eta_0$  – начальное значение вязкости смеси.

Проинтегрируем основные дифференциальные уравнения модели [2] для смолы и отвердителя по длине реакционного слоя  $L(t)$ , с учётом отсутствия влияния кинетической компоненты модели на изменение массы смеси, получим выражение для массы непрореагировавших компонентов смеси:

$$\frac{dm^{ep(am)}(t)}{dt} = D \left( \eta(\psi(L(t), t)) \right) \frac{\partial c^{ep(am)}(L(t), t)}{\partial x} = -\alpha_{ep(am)}(\eta(\psi(x, t))) C^{ep(am)}(L(t), t).$$

Здесь  $m^{ep(am)}(t) = M \int_0^{L(t)} C^{ep(am)}(x, t) dx$ , где  $M$  – масса реакционной смеси при  $t=0$ ,  $\eta(\psi(x, t))$  – эмпирическая формула Чонга для вязкости смеси,  $\psi(x, t)$  – массовая доля прореагировавших молекул. Тогда искомые эффективные параметры могут быть найдены на основе экспериментальных данных, полученных методами термогравиметрического анализа, реологического анализа и FTIR-спектроскопии. На основе результатов серии экспериментов, описанных в работах [5,6], были получены следующие значения эффективных параметров:  $z^{ep} \approx 2969.9$ ,  $z^{am} \approx 2320.8$ ,  $p^{ep} \approx 0.05$ ,  $p^{am} \approx 0.06$ . Эксперименты проводились для эпоксидной смолы «L» и отвердителя «EPH 161» при температуре  $T = 45^\circ \text{C}$ .

## Литература

1. Кондюрин А. В., Нечитайло Г. С. Композиционный материал для надувных конструкций, фотоотверждающийся в условиях орбитального космического полета // *Космонавтика и ракетостроение*. — 2009. — Т. 3 (56). — С. 182–190.
2. Rusakov, S.V., Gilev, V.G., Rakhmanov, A.Y. (2021). Diffusion-Kinetic Model for Curing of Epoxy Polymer. In: Domoshnitsky, A., Rasin, A., Padhi, S. (eds) *Functional Differential Equations and Applications. FDEA 2019. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, vol 379. Springer, Singapore.
3. Русаков С.В., Кондюрин А.В., Свисков А.Л., Гилев В.Г., Чудинов В.С., Математическая модель процесса полимеризации низкотемпературного отверждаемого эпоксид-полимера, *Материалы II Международной научной конференции "Высокие технологии, определяющие качество жизни"*, Пермь, 2018, С. 167-169.
4. Русаков С.В., Свисков А. Л., Комар Л.А., Кондюрин А. В., Моделирование отверждения эпоксидной смолы в условиях открытого космоса, *Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВСМПС'2013)*, 2013, С. 128 - 130)
5. С. В. Русаков, В.Г. Гилёв, А.Ю. Рахманов, В.Н. Терпугов, Численное и экспериментальное исследование кинетики испарения эпоксидного связующего и его компонентов в условиях лабораторного вакуума // *Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020)*, Алушта, 2020, с. 333-335.
6. Gilev, V. G., Rusakov, S. V., Chudinov, V. S., Rakhmanov, A. Y., & Kondyurin, A. V. (2021). Modeling the Curing Kinetics of an Epoxy Binder with Disturbed Stoichiometry for a Composite Material of Aerospace Purpose. *Mechanics of Composite Materials*, 57(3), 361–372. doi:10.1007/s11029-021-09960-3.

# УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЛЬСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Гончаров К. И.<sup>1</sup>, Бобров А. Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», 191, ул. Дуси Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, Россия, kirya.pochta@gmail.com

Неразрушающий контроль рельсов является неотъемлемым компонентом обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте, и раннее выявление имеющихся дефектов играет ключевую роль в обеспечении этой безопасности. Долговечность рельсов является определяющим фактором, зависящим от того, насколько быстро микротрещины развиваются в контактной зоне рельсов в кривых участках пути. Своевременное обнаружение таких дефектов позволяет контролировать качество рельсов, контрольный процесс их шлифования и обеспечивать технологическую стойкость железнодорожного пути [1].

Решение задачи обнаружения и определения глубины усталостных трещин в поверхностном слое головки рельсов является насущной проблемой, которая стоит перед железнодорожными предприятиями. Исследования в данной области проводятся с использованием метода вихревых токов, а для контроля поверхностных трещин при производстве рельсов применяются поверхностные ультразвуковые волны.

Учитывая достаточно высокую чувствительность волн Рэлея к поверхностным дефектам в данной работе экспериментально исследованы возможности контроля поверхностными волнами контактно-усталостных трещин.

Исследования были выполнены с использованием преобразователей поверхностных волн, работающих на различных частотах: 1,25, 1,8, 2,5 и 4 МГц с применением ультразвукового дефектоскопа УДЗ-204. Относительная амплитуда сигнала, полученного от отражателей, была измерена методом эхо-импульса и сравнена с амплитудой опорного сигнала, отраженного от прямого угла на стандартном образце на определенном расстоянии. Результаты измерений показали, что амплитуда поверхностных волн убывает слабо с увеличением расстояния и изменяется на 5-7 дБ в пределах 100 мм для волн всех исследованных частот, однако на частоте затухание волн возрастает примерно в два раза.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что ультразвуковым методом не обнаруживаются контактно-усталостные трещины глубиной менее 0,5 мм, в то время как более крупные трещины отражают сигналы с значительно меньшей амплитудой, чем аналогичные сигналы от искусственных дефектов на 6-10 дБ. Наибольшая чувствительность к таким трещинам наблюдается у волн частотой 2,5 МГц. Важным преимуществом ультразвукового метода контроля поверхностных трещин является способность частично огибать волной поверхностные трещины и возможность обнаруживать и регистрировать несколько дефектов, находящихся на пути волн Рэлея. Это позволяет определять участки с одиночными дефектами и те, на которых образуется сетка контактно-усталостных трещин.

Учитывая, что вихревоковый метод контроля чувствителен к мелким неоднородностям [2], комбинирование этого метода с ультразвуковым методом помогает определять глубину распространения контактно-усталостных трещин. Это существенно влияет на коррекцию мероприятий по восстановлению профиля рельсов путем шлифования.

## Литература

1. Ильиных А.С., Аксёнов В.А., Юркова Е.О., Матафонов А.В. Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 4 (51). С. 40-45.
2. Шляхтенков С.П., Некрасов Д.Б., Палагин С.В., Бессонова О.В., Попков А.А., Бехер С.А. Дефектоскопия. 2023. № 4. С. 37-45.

## ЛАБОРАТОРНАЯ ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ К ОБРАЗОВАНИЮ НАРОСТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЕЧНЫХ РОЛИКОВ

Берсенев К. А.<sup>1,3</sup>, Пузанов М. П.<sup>2</sup>, Чернов А. А.<sup>1</sup>, Коробов Ю. С.<sup>1,3</sup>, Каренина Л. С.<sup>2</sup>, Худорожкова Ю. В.<sup>4</sup>, Макаров А. В.<sup>1,3</sup>, Давыдов Д. И.<sup>1</sup>, Кинжебаева Г. М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, д. 18, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620137, Российская федерация

<sup>2</sup>Публичное акционерное общество «Новолипецкий металлургический комбинат», д. 2, пл. Металлургов, г. Липецк, 398040, Российская федерация

<sup>3</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Российская федерация

<sup>4</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская федерация

На поверхности печных роликов агрегатов рекристаллизационного отжига (АРО) при обработке холоднокатаной стали образуются наросты. При прокатке они вызывают формирование надавов на поверхности листа, снижающих его качество [1]. Такой дефект распространен, например, при изготовлении автомобильного листа и электротехнической (трансформаторной) стали. Для снижения склонности к образованию наростов используют различные методы: варьирование химического состава ленты и роликов, нанесение защитных покрытий, установка промежуточных деталей, например, карбонового рукава. Оценка этих вариантов требует проведения испытаний, которые в натуральных условиях отличаются большой длительностью и высокими затратами.

Была разработана лабораторная методика оценки склонности к образованию наростов при высокотемпературном контакте металлических поверхностей. Согласно методике, принудительно сформированный сэндвич-блок «пластина-полоса-пластина», размером 50x20x20 мм размещают в муфельной печи, где он подвержен одновременному воздействию давления, температуры, влажности в азотно-водородной атмосфере.

Был проведен непрерывный эксперимент в течение 96 часов при температуре в печи 850–900 °С, (N<sub>2</sub> + 5 % H<sub>2</sub>) атмосфере, влажность которой соответствует точке росы в условиях рекристаллизационного отжига. Для пластин, как аналогов печного ролика, использовали сталь ЭИ283, для полосы использовали характерную электротехническую сталь Fe-3%Si. Эксперимент показал, что по разработанной методике на поверхности пластин образуются наросты, аналогичные по форме наростам, которые появляются в процессе эксплуатации на печных роликах АРО.

Изучение микроструктуры, СЭМ и рентгенофазового анализа показали, что химический и фазовый составы наростов в лабораторных и натуральных условиях аналогичен. Имеется различие по содержанию кислорода, что обусловлено меньшей, примерно в 40 раз, длительностью лабораторного эксперимента и окислением печного ролика при охлаждении на воздухе.

Для сравнения по данной методике были испытаны пластины из стали ЭИ283 с нанесённым плазменным напылением NiCrAlY-покрытием. На поверхности покрытия визуально отмечено отсутствие наростов, что свидетельствует об изменении темпа и, возможно, механизма образования наростов при варьировании материала поверхности.

Полученные результаты свидетельствуют о достоверности лабораторной оценки по разработанной методике склонности к образованию наростов на поверхности печных роликов.

### Литература

1. Миндлин, Б.И. Изотропная электротехническая сталь. М: Интермет Инжиниринг, 2006, 239 с.



# МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Романов К. А., Швейкин А. И., Трусов П. В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29,  
пр. Комсомольский, г. Пермь, 614990, Российская Федерация  
[k.a.kriv@mail.ru](mailto:k.a.kriv@mail.ru), [shveykin@pstu.ru](mailto:shveykin@pstu.ru), [tpv@matmod.pstu.ac.ru](mailto:tpv@matmod.pstu.ac.ru)*

Важнейшим способом создания металлических деталей и конструкций является обработка заготовок давлением с применением интенсивных пластических деформаций (ИПД), что позволяет придать необходимую форму изделию и обеспечить требуемые физико-механические свойства. При гомологических температурах значительно ниже 0.5 (в частности, при комнатной температуре) при неупругом деформировании металлов и сплавов методами ИПД за счет процессов эволюции дефектной структуры происходит измельчение (фрагментация) зеренной структуры. Важность описания процесса измельчения в ходе многостадийных технологических процессов обусловлена наличием в них этапов, которые проводятся при низких гомологических температурах [1, 2]. На сегодняшний день многоуровневый подход, основанный на физических теориях пластичности [3], является наиболее перспективным для моделирования изменения физико-механических свойств готовых изделий, что достигается за счет явного описания в нем взаимодействующих механизмов деформирования на различных структурно-масштабных уровнях и эволюции внутренней структуры.

В работе представлены результаты по интеграции в ранее разработанную двухуровневую статистическую конститутивную модель (КМ) ГЦК-поликристалла [3], учитывающую внутризеренное скольжение краевых дислокаций и ротации решеток кристаллитов, модифицированных соотношений модели ЕТМВ (Y. Estrin, L.S. Toth, A. Molinari, Y. Brechet) [4, 5] для описания измельчения. В последней рассматривается эволюция среднего размера ячеек при деформировании, который при больших деформациях сопоставим со средним размером зерна. Двухуровневая КМ с модифицированной моделью ЕТМВ применена для описания равноканального углового прессования меди при комнатной температуре. Полученные результаты по пределам текучести на растяжение, текстурам, плотностям дислокаций и среднему размеру ячеек удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [6]. Проведено численное моделирование технологического процесса холодной гибки стали 8X18H10 (AISI 304L) с совместным использованием КМ с моделью ЕТМВ, по результатам которого выбран режим гибки, приводящий к меньшему среднему размеру ячеек.

Для более углубленного описания процесса измельчения предложена детализированная модель, в которой каждое зерно рассматривается состоящим из отдельных ячеек, объединенных в блоки. При деформировании ячейки меняют свой размер и разворачиваются друг относительно друга, образуя субзерна, которые также за счет разворотов трансформируются в зерна, что в конечном итоге приводит к образованию новой мелкозернистой структуры.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).*

## *Литература*

1. М. Odnobokova, A. Belyakov, R. Kaibyshev. *Philosophical magazine*. 2019, Vol. 99, № 5, 531–556.
2. Д.О. Панов, А.И. Смирнов, А.С. Перцев. *Физика металлов и металловедение*. 2019, Т. 120, № 2, 198–204.
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.
4. Y. Estrin, L.S. Toth, A. Molinari, Y. Brechet. *Acta Materialia*. 1998, Vol. 46, № 15, 5509–5522.
5. L.S. Toth, A. Molinari, Y. Estrin. *J. Eng. Mater. Technol.* 2002, Vol. 124, 71–77.
6. K. Romanov, A. Shveykin, P. Trusov. *Metals*. 2023, Vol. 13, 953 (19 p.).

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА В БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЕ, ПОДВЕРГНУТОЙ КЛИМАТИЧЕСКОМУ СТАРЕНИЮ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Гаврильева А. А., Лебедев М. П., Кычкин А. К., Кротов А. С., Старцев О. В.

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,  
1, Октябрьская, Якутск, 677000, Россия, gav-ann@yandex.ru.*

Хорошо известно, что базальтопластиковая арматура (БПА) имеет ряд преимуществ перед металлическими стержнями: коррозионная стойкость, низкая теплопроводность, магнитоинертность, хорошая пропускная способность радиоволн, механическая прочность, лёгкость. В свою очередь, выделяются преимущества полимерных материалов, армированных базальтовыми волокнами, по сравнению с полимерными материалами, армированными другими неметаллическими стержнями, в механических характеристиках, стоимости, стойкости к различным агрессивным средам, биологической стойкости [1-11]. Далее необходимы подтверждение и обоснование сохранения свойств БПА на высоком уровне при длительной эксплуатации в различных климатических условиях, в том числе в условиях экстремально холодного климата. В работе [12] проведена экспериментальная оценка климатической стойкости БПА на ранних стадиях экспонирования в экстремально-холодном, и умеренно-теплом морском климате с использованием чувствительных физических методов оценки изменения структуры и состояния БПА при климатическом старении [13, 14, 15]. В том числе, согласно [15] были оценены возможные физико-химические и структурные превращения при экспонировании БПА с помощью изменения коэффициента диффузии влаги и максимального влагосодержания. При этом использовалась одномерная модель диффузии влаги Фика. В данной работе влагоперенос в БПА моделируется двумерной моделью диффузии Фика, определены поперечная к поверхности и продольная составляющая коэффициента диффузии влаги, при этом показатели влагопереноса определяются, как и в поверхностном деструктивном слое, возникающий при климатическом старении, так и в объеме БПА, что позволяет, выявить деструктивные процессы, развивающиеся на поверхности, не оказывающие значимого влияния на величину контролируемых деформационно-прочностных показателей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№1023031300030-0-2.5.1) с использованием научного оборудования ЦКП Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН в рамках реализации мероприятий по гранту №13.ЦКП.210016.

## *Литература*

1. K. Singha. *Int. J. Text. Sci.* 2012, 1, 19 – 28.
2. Parnas R. *Montgomery Shaw and Qiang Liu Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites. Technical Report NETCR63. Institute of Materials Science, University of Connecticut, 2007, 133 p.*
3. G. Alaimo, A. Valenza, D. Enea, V. Fiore. *Materials and Structures.* 2015, 49, 2053 – 2064.
4. G. Wu, X. Wang, Z. Wu, Z. Dong, G. Zhang. *Journal of Composite Materials.* 2014, 49, 7, 873 – 887.
5. Q. Liu, M.T. Shaw, R.S. Parnas, A. McDonnell. *Polymer Composites.* 2006, 27, 41 – 48.
6. Y. Xie, K. Guan, L. Lai. *Int. J. Polym. Sci.* 2016, 2016, Article ID 7162313.
7. M. A. Ammar. *Bond Durability of Basalt Fibre-Reinforced Polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions. Thesis. Quebec. Canada, 2014, 125 p.*
8. M. Najafi, S.M.R. Khalili, R.E. Farsani. *Mech. Adv. Compos. Mater.* 2016, 3, 1 – 7
9. M.F. Noor, R.A. Pasha, A. Wakeel, M.A. Nasir, Y. Bilal. *Mech. Adv. Compos. Mater.* 2017, 11, 80 – 86.
10. A. El Refai, F. Abed, A. Altalmas. *J. Compos. Constr.* 2015, 19, 04014078.
11. B. Anand. *J. Compos.* 2013, 2, 566–570.
12. V. O. Startsev, M. P. Lebedev, A. K. Kychkin. *Heliyon.* 2018, 4, e01060.
13. A.N. Blaznov, E.V. Atyasova, I.K. Shundrina and etc. *Polym. Test.* 2017, 60, 49 – 57.
14. O.V. Startsev, A.S. Krotov, P. Golub. *Polym. Polym. Compos.* 1998, 6, 481 – 488.
15. Е. Н. Каблов, О. В. Старцев, С. В. Панин. *Доклады Академии наук.* 2015, 461, 4, 433 – 436.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОУРОВНЕВОГО ПОДХОДА

Кондратьев Н. С., Подседерцев А. Н., Балдин М. Н., Безверхий Д. С.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Российская Федерация, [kondratevns@gmail.com](mailto:kondratevns@gmail.com), [bezverkhyds@yandex.ru](mailto:bezverkhyds@yandex.ru)*

Большинство технологических процессов обработки металлов и сплавов давлением (ковка, прокатка, вытяжка, экструзия и др.) реализуются при повышенных температурах. Это приводит к существенному перестроению структуры материала вследствие реализации термоактивируемых процессов на различных масштабных уровнях. Значительные структурные изменения происходят в результате рекристаллизации. Рекристаллизация заключается в образовании малодефектных зерен в деформированном материале и последующем их росте за счет миграции высокоугловых границ (или их участков), движущей силой которой является разность энергий, запасенной при неупругом деформировании в соседствующих зернах. В результате рекристаллизации изменяется форма, размеры, ориентация кристаллографической системы координат новых зерен. Формулируется задача описания неупругого деформирования поликристалла при термомеханических воздействиях с учетом изменения в результате реализации рекристаллизации материальной структуры, влияющей на макросвойства.

Для решения поставленной задачи применяется подход многоуровневого моделирования с внутренними переменными, в явном виде позволяющий учитывать эволюционирующую структуру материала [1]. Для описания прерывистой динамической рекристаллизации предлагается модификация расширенной модели с учетом топологии зеренной структуры и локального взаимодействия по плоским участкам границ зерен [2]. Предлагается способ перестроения топологии зеренной структуры при рекристаллизации [3]. Рекристаллизация приводит к существенному перестроению зеренной, субзеренной и дефектной структуры материала. При определенных режимах термомеханической обработки поликристаллов возможно объединение соседних субзерен в кластеры при коалесценции. Кластеры субзерен вблизи большеугловых границ являются потенциальными зародышами рекристаллизации. В рамках многоуровневого подхода предложена модель коалесценции [4], влияющая на развитие рекристаллизации. Для моделирования технологических процессов обработки металлов и сплавов предложена модификация вычислительно эффективной многоуровневой конститутивной модели, применимой для исследования напряженно-деформированного состояния и состояния зеренной и дефектной структур. Разработанная модель базируется на основе двухуровневой статистической модели неупругого деформирования материала [2], дополненной физическими соотношениями для описания рекристаллизации и возврата.

В работе представлены результаты многоуровневого моделирования поведения поликристаллических образцов, включающие описание изменяющейся структуры материала, исследовано влияние температуры, скорости деформации, начального состояния субзеренной структуры на ход процесса рекристаллизации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

## *Литература*

1. *Трусов П.В., Швейкин А.И., Кондратьев Н.С., Янц А.Ю. Физическая мезомеханика. 2020, 23, 6, 33-62.*
2. *Trusov P., Kondratev N., Podsedertsev A. Crystals. 2022, 12, 5, 653.*
3. *Trusov P., Kondratev N., Podsedertsev A. Metals, 2023, 13, 1, 113.*
4. *Trusov P., Kondratev N., Baldin M., Bezverkhy D. Materials, 2023, 16, 7, 2810.*

# МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, КОМПЛЕКСНО УЧИТЫВАЮЩАЯ ТЕМПЕРАТУРУ И СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ

Вшивкова А. А.<sup>1</sup>, Швейкин А. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, РФ, [vshivkova.anastasiya@yandex.ru](mailto:vshivkova.anastasiya@yandex.ru)

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, РФ, [shveykin@pstu.ru](mailto:shveykin@pstu.ru)

Исследуются вопросы моделирования эффектов, связанных с влиянием температурно-скоростных условий на отклик поликристаллических металлов. В частности, рассматриваются такие типичные эффекты, как уменьшение напряжения течения с уменьшением скорости деформации и ростом температуры, зависимость скоростной чувствительности отклика от температуры [1].

Используется подход многоуровневого моделирования материалов с явным описанием структуры и основных механизмов неупругого деформирования [2]. В качестве базовой применяется двухуровневая статистическая модель [2], учитывающая внутризеренное дислокационное скольжение и ротации решеток кристаллитов. Описание ведется в терминах скоростей сдвигов без явного введения плотностей дислокаций и появления дополнительных масштабных уровней, что делает возможным с вычислительной точки зрения применение модели к решению практических задач оптимизации технологических процессов. На основе анализа известных в литературе подходов к учету температурно-скоростных условий, обзор результатов которого приведен в [3], была предложена [4] модификация базовой конститутивной модели для случая произвольных изменений температуры и скорости деформации в процессе нагружения, в которую в преобразованной форме включены дислокационно-ориентированные соотношения [5].

Предложенная модель идентифицирована и верифицирована для сплава Al 2024-T351 с ГЦК решеткой с использованием экспериментальных данных [6]. Для нахождения значений параметров модели для произвольного материала с ГЦК-решеткой разработан пошаговый алгоритм, связанный с группировкой параметров по учитываемым через них механизмам упрочнения и разупрочнения [4]. Результаты моделирования, в частности, для нагружения с изменяющимися условиями, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

## Литература

1. U.F. Kocks, H. Mecking. *Progress in Materials Science*. 2003, V. 48, 171–273
2. Трусов П.В., Швейкин А.И. *Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения*. Издательство СО РАН, 2019, 605
3. А.И. Швейкин, А.А. Вшивкова, П.В. Трусов. *Физическая мезомеханика*. 2023, Т. 26, Вып. 6, 27–48
4. А.И. Швейкин, А.А. Вшивкова, П.В. Трусов. *Физическая мезомеханика*. 2024, *принята к печати*
5. I.J. Beyerlein, C.N. Tome. *International Journal of Plasticity*. 2008, V. 24, Iss. 5, 867–895
6. A.S. Khan, H. Liu. *International Journal of Plasticity*. 2012, V. 36, 1–14

# СТАТИСТИЧЕСКИЙ БУТСТРЕП КАК СРЕДСТВО ВЫЧИСЛЕНИЯ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ЦИФРОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Гадолина И. В.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, д. 4. Малый Харитоньевский переулок, Москва, 101000, Россия, gadolina@mail.ru*

Метод корреляции цифровых изображений давно нашел свое место в инструментарии исследования деформаций в металлах и композитах благодаря большей точности измерений и высокому уровню автоматизации. Многочисленные литературные ссылки свидетельствуют о его популярности [1]. Несмотря на обилие публикаций, нам не удалось найти материалов по исследованию вариабельности метода, а ведь как во всяком статистическом инструменте точечная оценка не является достаточной – нужна оценка точности, доверительные интервалы. В данном докладе мы постарались восполнить этот пробел. Для оценки вариабельности измерений деформаций предложено использовать статистический бутстреп, почти универсальный метод для оценки дисперсии.

Задача оценки изменчивости при проведении оптических измерений с использованием статистического бутстрепа была рассмотрена рядом авторов. Авторы [2] описывают непараметрический метод бутстрепа, применяемый в медицине, для оценки статистических свойств изображений. Статистический бутстреп был предложен в [3] и с тех пор активно применяется.

В докладе как рабочий метод используется Метод Корреляции и отслеживания цифровых изображений - это оптический метод, в котором используются методы отслеживания и регистрации изображений для точных измерений [1]. Этот метод часто применяется во многих областях науки и техники и используется для измерения смещений и деформаций по всему полю. В основе метода лежит максимизация коэффициента корреляции, который определяется интенсивностью массива рассматриваемых пикселей (спеклов) на компьютерных изображениях до и после деформации. Согласно предлагаемому методу в соответствии с правилами бутстреп спеклы на изображении после деформации «размножаются» и по ним образуются бутстреп-выборки, которые позволяют судить о вариабельности оценки.

На рисунке показан пример компьютерной обработки DIC малогабаритного композитного образца на стадии разрушения

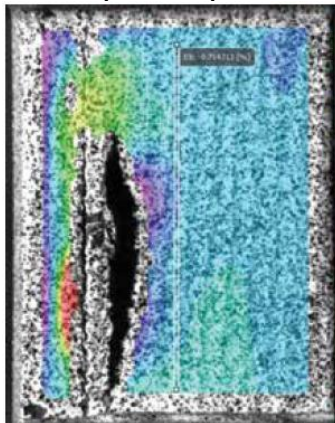


Рис. 1. Компьютерная обработка DIC малогабаритного композитного образца на стадии разрушения

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097/>

## Литература

1. Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневич А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П. Исследование процесса деформации материала оптико-корреляционными методами // *Авиационные материалы и технологии*. №54 2014 с. 70-85.
2. Vivat I., Riddell C. A bootstrap approach for analyzing the statistical properties of SPECT and PET images // *Nucl Sci Symp Conf Rec.* 3. 2001. vol.3. P.1419 – 1423.
3. Эфрон, Б. *Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. (сборник) / Финансы и статистика.* 1988. 262 с.

# MODELLING THE DYNAMIC RESPONSE OF A HIERARCHICALLY STRUCTURED BAMBOO BEAM CONSIDERING TENSION-COMPRESSION ASYMMETRY

Rezazadeh Ghader<sup>\*1</sup>, Jahangiri Reza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Materials Technology, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia.

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Islamic Azad University, Slamas Branch, salmas, Iran

This study examines the dynamic response of bamboo beams to time-dependent external forces, taking into account the distinct mechanical behavior observed in tension and compression loading scenarios [1-3]. To accurately represent the material response, a nonlinear constitutive model is developed due to the inherent tension-compression asymmetry. The asymmetry is effectively captured through the application of a nonlinear consecutive model, calibrated using experimental data via a least squares method. In this study, the effects of tension-compression asymmetry and hierarchical structure on bamboo beams are investigated, taking into account the beams' hierarchical structure [1-3] where the equivalent constitutive constants vary with the beam's height. The study emphasizes the importance of considering longitudinal motion alongside flexural vibration analysis. These findings offer valuable insights for structural engineering and biomimetic design applications. Understanding the intricate dynamics of bamboo beams is essential for optimizing their performance and durability. To derive the governing differential longitudinal and flexural motion equation considering different distinct behavior in tension and compression are replaced by a polynomial as Eq. (1) and the hierarchical behavior is taken into account through Eq (2).

$$\sigma_T^O = E_T^O \varepsilon, \sigma_T^I = E_T^I \varepsilon; \sigma_C^O = E_C^O \varepsilon, \sigma_C^I = E_C^I \varepsilon, \quad (1)$$

$$\sigma^O = \kappa^O (E_C^O, E_T^O \varepsilon) = \sum_{n=1}^N \alpha_n^O \varepsilon^n; \sigma^I = \kappa^I (E_C^I, E_T^I, \varepsilon) = \sum_{n=1}^N \alpha_n^I \varepsilon^n$$

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \alpha_n(z, k) \varepsilon^n; \quad \alpha_n(z, k) = (\alpha_n^I - \alpha_n^O) \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k - \alpha_n^O; \quad n = 1, \dots, N \quad (2)$$

Based on the new constitutive model presented in equations (1) and (2), and the Principle of Hamilton, the governing equations for longitudinal and flexural motion are as follows, respectively.

$$\mathbb{N}_1(u_0(x, t), w(x, t)) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \int_A \left[ \sum_{n=1}^N \alpha_n \left( \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right)^n \right] dA \right\} - C_1 \frac{\partial u_0}{\partial t} - \rho A \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \mathbb{N}_2(u_0(x, t), w(x, t), F_e(w(x, t))) \\ &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left\{ \int_A z \left[ \sum_{n=1}^N \alpha_n(z, k) \left( \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right)^n \right] dA \right\} \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_A \left[ \sum_{n=1}^N \alpha_n(z, k) \left( \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right)^n \right] dA \right) \frac{\partial w}{\partial x} + C_2 \frac{\partial w}{\partial t} \\ & + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - F(x, t) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Here  $u_0$ ,  $w$  and  $F(x, t)$  represent the axial and transverse motion of the beam's mid-plane and the external force, respectively. The nonlinear governing equations are used to generate a time history, which is then integrated over time using the RK4 method. The steady-state response is obtained using the energy balance method. The results are analyzed for different parameters of the model to gain a comprehensive understanding of the system's behavior.

## References

1. Habibi, M.K., Samaei, A.T., Gheshlaghi, B., Lu, J., Lu, Y., *Asymmetric flexural behavior from bamboo's functionally graded hierarchical structure: Underlying mechanisms*, *Acta Biomaterialia* (2015),
2. Huang Dongsheng, Zhou Aiping, Bian Yuling, *Experimental and analytical study on the nonlinear bending of parallel strand bamboo beams*, *Construction and Building Materials* 44 (2013) 585–592
3. M.T. Wang, X.F. Cai, Y.B. Lu, A. Noori, F.M. Chen, L.B. Chen, X.Q. Jiang, J.Q. Liu; *Tensile mechanical properties and failure mechanism of bamboo scrimber under different strain rates*, *Construction and Building Materials* 299 (2021) 124258

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА С ФИКСАЦИЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Жихарев М. В.<sup>1</sup>, Сапожников С. Б.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ЮУрГУ (НИУ), 76, просп. Ленина, г. Челябинск, 454080, Россия,  
[zhikharevmv@susu.ru](mailto:zhikharevmv@susu.ru)

<sup>2</sup> ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, 1, ул. Жуковского, г. Жуковский,  
Московская область, 140180, Россия,  
[sapozhnikovsb@susu.ru](mailto:sapozhnikovsb@susu.ru)

Применение углепластиков в современных высоконагруженных конструкциях автомобильной и авиационно-космической техники непрерывно расширяется. При этом возрастает актуальность мониторинга состояния поврежденности в процессе эксплуатации. Среди методов мониторинга крупных дефектов типа расслоений или трещин с разрывом волокон от локальных ударных воздействий наибольшей информативностью обладают контактные методы с измерением электрического импеданса при постоянном и переменном токе [1,2], а также акустические [3], в которых пьезосенсоры, установленные на конструкции, фиксируют импульсы от локальных микроповреждений волокон и полимерной матрицы на границе с волокнами (импульсы акустической эмиссии).

Следует, однако, отметить, что в литературе нет данных об изменении электросопротивления композитов при циклическом нагружении вплоть до разрушения, т.е. при сравнительно больших деформациях и при развитии микроповреждений типа разрывов волокон и отслоений на интерфейсе «волокно/матрица» («в/м»), что и определило тему данной работы в аспекте мониторинга состояния углепластика при растяжении.

В работе проведены экспериментальные исследования событий акустической эмиссии в слоистом углепластике с косопоперекрестной укладкой волокон при однократном и циклическом растяжении с возрастающей амплитудой и изменения электрического сопротивления образца вдоль оси нагружения. Программа циклического нагружения состояла из ряда блоков по два одинаковых цикла нагружения/разгрузки с возрастанием напряжений между блоками вплоть до разрушения. Рассмотрены образцы углепластика в виде лопаток из однонаправленных слоёв с косопоперекрестными укладками волокон [0°], [±15°], [±30°] и [±45°].



Рис. 1. Образец в захватах испытательной машины

Для измерения электросопротивления при постоянном токе использован микроомметр УТ-602А и четырёхпроводная схема с контактами Кельвина. Развитие событий акустической эмиссии фиксировали с помощью системы СЦАД-63, установив на консистентную смазку два пьезосенсора диаметром 20 мм на расстоянии 25 мм. Образец в захватах с установленным экстензометром, сенсорами акустической эмиссии и зажимами показан на рисунке 1.

Показано, что при циклическом растяжении электрическое сопротивление косопоперекрестного углепластика изменяется волнообразно: увеличиваясь при малых нагрузках, снижаясь при нагрузках среднего уровня и существенно увеличиваясь при напряжениях более 80% от разрушающих. Показано, что акустические события развиваются в первом полуцикле каждого блока, тогда как во втором цикле блока их интенсивность резко падает, при этом имеют место акустические события на этапах разгрузки.

*Материал подготовлен при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение от 17 мая 2022 г. № 075-15-2022-1023).*

## Литература

1. Б.В. Бойцов, С.Л. Васильев, А.Г. Громашев, С.А. Юргенсон. Электронный журнал «Труды МАИ». 2011, вып.49, 11 с.
2. В.В. Поляков, С.Ф. Дмитриев, А.В. Иииков, Г.Е. Руденский, Е.А. Колубаев. Ползуновский вестник. 2013, №2, с.133-138.
3. M. Saeedifar, D. Zarouchas. Composites Part B: Engineering. 2020, Vol. 195, paper 108039.

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ $\text{W}_4\text{C-CrB}_2$ , ПОЛУЧЕННОЙ РЕАКЦИОННЫМ ГОРЯЧИМ ПРЕССОВАНИЕМ

Филиппов А. А.<sup>1</sup>, Дик Д. В.<sup>1</sup>, Бурхинова Н. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 4/1, ул. Институтская, г. Новосибирск, Россия, 630090 [filippov@itam.nsc.ru](mailto:filippov@itam.nsc.ru)

Керамика на основе карбида бора является привлекательным материалом для многочисленных применений из-за сочетания высокой температуры плавления, высокой прочности и твердости, износостойкости, жаростойкости и химической инертности. Тем не менее, промышленное изготовление материалов из коммерчески распространяемых порошков карбида бора реализуемо только с помощью горячего прессования при температурах 1950-2200°C, прикладываемых давлениях >45 МПа и временах выдержки более 30 минут, что значительно усложняет процесс получения изделий из карбида бора. Для снижения параметров горячего прессования могут быть использованы субмикронные порошки карбида бора, углерода, а также диборидов переходных металлов IV-VI ( $\text{MeB}_2$ ) групп таблицы Менделеева. Получение субмикронного карбида бора достаточно дорого, добавки углеродной сажи вносят существенный рост внутренних дефектов, поэтому дибориды металлов представляются весьма перспективными материалами в качестве добавок при спекании. Целью настоящей работы является изучение механических свойств композиционной керамики  $\text{W}_4\text{C-CrB}_2$ , синтезированной с использованием нановолокнистого углерода в зависимости от заданного мольного содержания диборида хрома в готовом продукте. Керамические композиты на основе  $\text{W}_4\text{C}$  с содержанием  $\text{CrB}_2$  0-30 мол. % были получены реакционным горячим прессованием шихты из  $\text{W}_4\text{C}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и нановолокнистого углерода при усилии пресса 17,5 МПа, температуре 2000°C и времени выдержки при максимальных параметрах 10 минут. Получены зависимости микротвердости и модуля упругости образцов от содержания  $\text{CrB}_2$ , они хорошо сходятся с теоретическими моделями. Керамика состава 90 $\text{W}_4\text{C}$ -10 $\text{CrB}_2$  мол. % полученная при заданных параметрах имеет плотность 99%, модуль упругости и микротвердость сравнимые с 99 % плотной керамикой SiC. Используя последовательно модели гомогенизации Рейсса и Фойгта, удалось получить зависимость, качественно описывающую модуль упругости гетерогенного материала с учетом пористости.

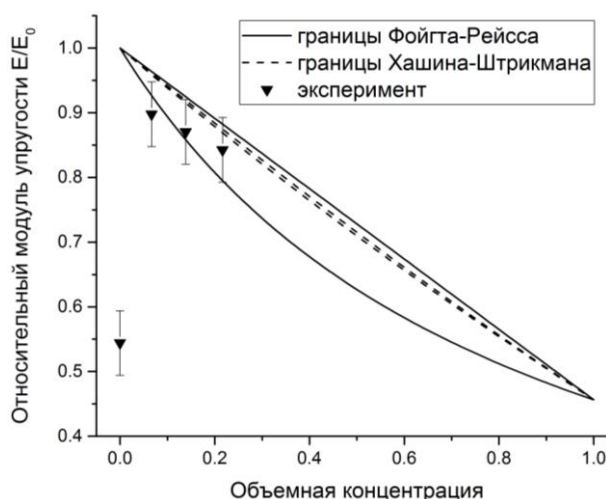


Рис. 1. Сравнение экспериментальной и теоретических зависимостей относительного модуля упругости для гетерогенного материала карбид бора-диборид хрома

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда No 24-21-00353 с использованием оборудования центра коллективного пользования «Механика».



# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРОШКОВЫХ ДОБАВОК TiC В ПОКРЫТИИ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

Шекшеев М. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 38, пр. Ленина, г. Магнитогорск, 455000, Россия,  
E-mail: shecsheev@yandex.ru

Безаварийная эксплуатация трубопроводов и сварных металлоконструкций зачастую определяется качеством сварных соединений [1].

К сварочным материалам предъявляются повышенные требования со стороны потребителей [2]. Требуемый уровень механических свойств металла швов сварных соединений должен обеспечиваться без применения дополнительных технологических операций, таких как предварительный и сопутствующий подогрев, а также послесварочная термическая обработка, которые необходимы для улучшения структуры металла сварных швов.

Перспективным способом управления структурообразованием металла сварных швов непосредственно в процессе сварки является инокулирование расплава сварочной ванны частицами тугоплавких материалов нано- и/или микронных размеров [3].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния порошка монокарбида титана на структуру и механические свойства наплавленного металла низкоуглеродистой стали.

Порошок TiC (рис. 1) вводили в расплав сварочной ванны через электродное покрытие основного типа. Наплавку пластин из стали 20 толщиной 6 мм производили методом наклонного электрода на постоянном токе обратной полярности при различных режимах сварки.

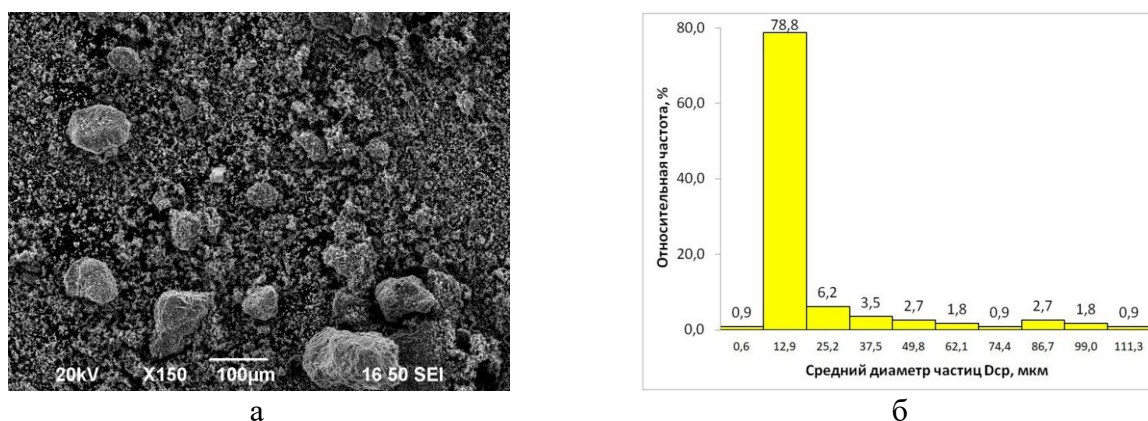


Рис. 1. Результаты гранулометрического анализа порошка TiC: а – внешний вид частиц порошка; б – относительная частота частиц в объеме порошка

Металлографические исследования показали, что макроструктура образцов наплавленного металла преимущественно характеризуется наличием кристаллитов различной площади сечения и морфологии, окруженных сеткой периферийного феррита, образующего непрерывную матрицу по границам первичных зерен.

Особенностью металла, наплавленного электродами с добавкой 1 % TiC, является наличие в локальных участках закалочных структур. Наблюдается повышение микротвердости наплавленного металла на 28,7 % в сравнении с базовым образцом, что можно связать с повышением дисперсности образующихся структур и наличием в металле закаленных участков.

## Литература

1. И.Н. Зверева, А.Д. Картунов и др. Особенности структуры и свойства сварных швов трубной стали, выполненных электродами различных марок // Сварочное производство. 2017. № 11. С. 37-40.
2. И.Н. Зверева, А.Д. Картунов и др. Электроды для ручной дуговой сварки в нефтегазовом комплексе // Электроды для ручной дуговой сварки в нефтегазовом комплексе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2015. Т. 15. № 1. С. 17-23.
3. М.А. Шекшеев, М.А. Полякова и др. Инокулирование сварочной ванны низкоуглеродистой стали ультрадисперсными тугоплавкими компонентами // Металлург. 2022. № 12. С. 63-68.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОЛИСТОВОМ ПРОКАТЕ МЕТОДОМ НАРАЩИВАНИЯ УЗКОГО ВЫРЕЗА

Одинцев И. Н., Плугатарь Т. П.\*

*Институт машиноведения им. А. А. Благодирова РАН,  
4, Малый Харитоньевский пер., г. Москва, 101990, Российская Федерация*

Известно, что технологические процессы производства металлопродукции, особенности обработки, отделки и хранения готовых изделий зачастую приводят к формированию в их материале самоуравновешенной системы остаточных напряжений (ОН) [1,2]. Их наличие может вызывать коробление, растрескивание из-за коррозии, хрупкое разрушение, понижение предела упругости, изменение предела усталости и пр., что в итоге будет определять потерю качества и снижение работоспособности элементов машиностроительных конструкций.

В задачах исследования ОН в силу ряда объективных причин основополагающая роль отводится экспериментальному анализу, причем получение наиболее достоверных результатов связано с использованием тех или иных разрушающих методов [3,4]. Так, для построения распределений ОН по толщине в тонколистовых объектах активно применяется метод послойного удаления материала с регистрацией возникающих на каждом шаге деформационных (изгибных) откликов. В определенной мере разновидностью такого подхода можно считать метод испытания вырезаемых из листовой заготовки образцов-балок, в которых последовательно наращивается по глубине узкий центральный вырез-паз [4,5]. При этом в ограниченной области, локализованной в окрестности выреза, создается неоднородное (объемное) деформированное состояние материала, а об уровнях ОН, обнуляемых на поверхностях паза на каждом шаге его углубления допустимо судить по приращениям угла взаимного жесткого поворота консольных частей образца.

### *Литература*

1. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel / Ed. G. Totten, M. Howes, T. Unoue. 2002. ASM International. P. 125-138.*
2. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. *Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург: Изд. Уральского университета. 2015. 248 с.*
3. Биргер И.А. *Остаточные напряжения. М.: Машиз. 1963. 233 с.*
4. Разумовский И.А., Одинцев И.Н., Плугатарь Т.П. *Методология экспериментально-расчетного исследования остаточных напряжений в элементах конструкций // Актуальные вопросы машиноведения. 2022. №.11. С. 116-119.*
5. Plugatar T.P., Odintsev I.N., Plotnikov A.S. *A Study of Stress Distributions in Case-Hardened Materials Layers // AIP Conference Proceedings: 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, Ekaterinburg. 2020. P. 040028.*

# ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Хорошевский К. А.<sup>1\*</sup>, Ерпалов А. В.<sup>1</sup>, Гадолина И. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), д. 76, просп. Ленина, 454080, Челябинск, Россия

\*e-mail: khoroshevskiika@susu.ru,

<sup>2</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, д. 4, Малый Харитоньевский переулок, 101000, Москва, Россия

При оценке долговечности изделий машиностроения используется две группы методов: временные и частотные. Временные методы считаются более точными и позволяют оценивать долговечность машин, работающих в условиях эксплуатационного нагружения, в том числе нестационарного. Основным недостатком таких методов является необходимость временной реализации напряжений. Наибольшую популярность среди временных методов получил метод “падающего дождя” [1]. Частотные методы не требуют временной реализации, что позволяет их использовать на этапе проектирования. Однако они работают только со стационарными гауссовскими процессами [1]. Развитие методов обработки и анализа случайных сигналов позволяет разрабатывать новые методы оценки долговечности.

В работе предлагается метод оценки долговечности, использующий эмпирическую модовую декомпозицию [2]. Алгоритм предложенного метода показан на рис. 1. Выполнено сравнение долговечностей, рассчитанных по предлагаемому методу и другим спектральным методам, с временным методом “падающего дождя”. Значения в процентах сведены в табл. 1.

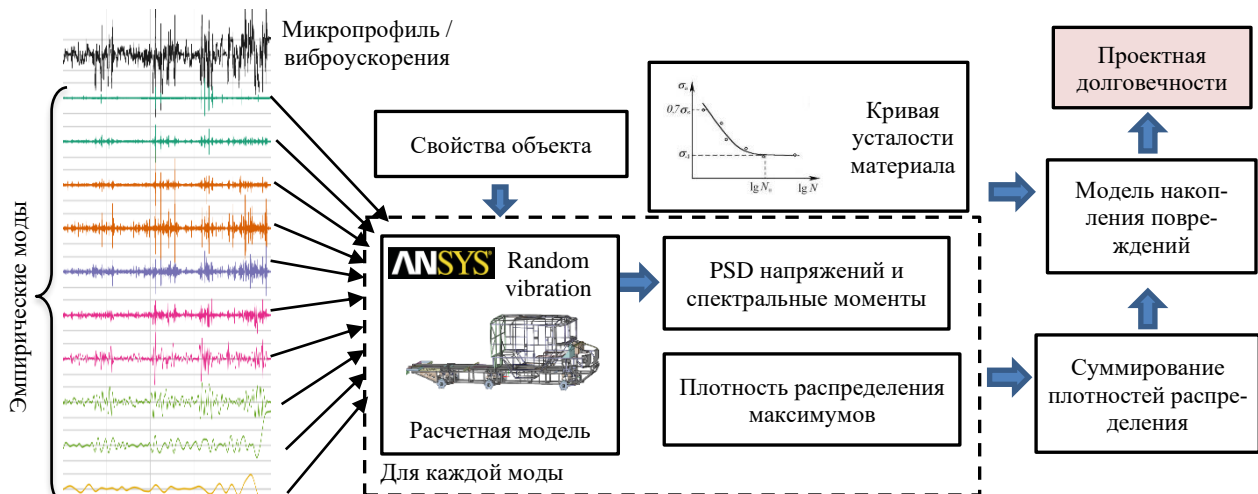


Рис. 1. Алгоритм предлагаемого метода

Таблица 1 – Сравнение методов

Тип случайного процесса	Предлагаемый метод	Спектральный метод	
		Дирлик	Тово-Бенессуэти
Стационарный узкополосный	8%	23%	23%
Стационарный типа «белый шум»	4%	39%	35%
Нестационарный в виде последовательных разных широкополосных	-48%	-361%	-395%

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097/>

## Литература

1. M. Muñiz-Calvente, A. Álvarez-Vázquez, F. Pelayo, M. Aenlle, N. García-Fernández, M.J. Lamela-Rey, *International Journal of Fatigue*, 2022г., Т.163, 107069
2. Norden E. Huang, Zheng Shen, Steven R. Long, Manli C. Wu, Hsing H. Shih, Quanan Zheng, Nai-Chyuan Yen, Chi Chao Tung and Henry H. Liu, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998г., Т. 454, Вып.1971, 903-995

# РАССЛОЕНИЕ КОМПОЗИТНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Волкова О. Ю.<sup>1</sup>, Дмитриев Н. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,

д. 4, Малый Харитоньевский пер., Москва, 101000, Россия, torondornikitadv@gmail.com

Исследованию разрушения композитных оболочек вращения вследствие расслоений посвящено значительно количество трудов. В работе Л.М. Качанова [1] впервые была рассмотрена задача о потере устойчивости внутреннего слоя цилиндрической оболочки под действием внешнего давления. Позднее энергетический подход, используемый в ней, получил дальнейшее развитие в работах В.В. Болотина и З.Х. Зебельяна [2], В.Я. Павилайна и М.С. Сайковой [3], а также А.Н. Полилова и О.Ю. Склеминой [4].

Проблемой является то, что критерий для потери устойчивости внутреннего слоя композитной цилиндрической оболочки не удается сформулировать в терминах критических напряжений. Вместо него может быть предложен энергетический критерий, который основан на сравнении начального  $U_1$  и конечного  $U_2$  значений упругой энергии, накопленной в ней.

В данной работе рассматривается задача с выщелкиванием внутреннего слоя композитного кольца, имеющего дефект в виде расслоения (Рис. 1). На кольцо с радиусом  $R$  равномерно действует сжимающее давление  $q$  в слое  $h \ll R$ . При неизвестном уровне критического напряжения внутренний слой кольца теряет свою устойчивость. Согласно энергетическому критерию, энергия  $U_1$  должна быть достаточной для выполнения работы по разрушению  $W$ , учитывая оставшуюся после выщелкивания упругую энергию изгиба  $U_2$ :

$$U_1 \geq U_2 + W.$$

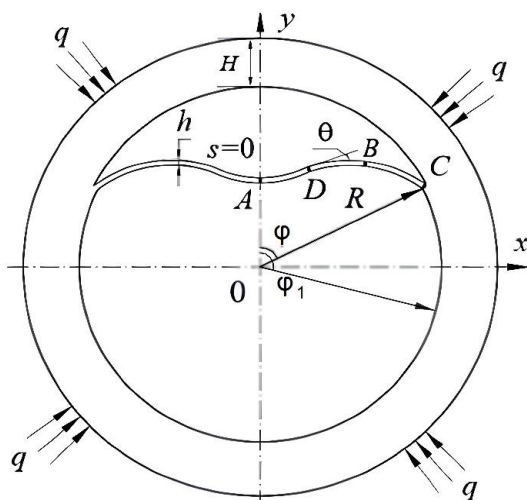


Рис. 1. Форма изгиба внутреннего слоя кольца после расслоения с выщелкиванием

Более точные модели расслоения кольца учитывают потенциальную энергию упругой деформации для его внешней дуги. Для этого энергетический критерий системы дополняется слагаемыми, характеризующими потенциальную энергию внешней дуги кольца до и после потери устойчивости (слагаемые  $T_1$  и  $T_2$  соответственно):

$$U_1 + T_1 \geq U_2 + T_2 + W.$$

Энергетический подход для решения задачи о расслоении композитной цилиндрической оболочки позволяет определить критические напряжения и деформации, при которых происходит потеря устойчивости. Кроме этого, опираясь на данный подход можно, найти толщину выщелкиваемого слоя, при которой эта критическая деформация минимальна.

## Литература

1. Л.М. Качанов. Расслоение стекловолоконистых труб при внешнем давлении // *Механика полимеров*. 1975. Т. 1, Вып. 6. 1106-1108.
2. В.В. Болотин, З.Х. Зебельян. Устойчивость упругих сферических оболочек с расслоениями // *Расчеты на прочность*. 1980, Т. 1, Вып. 22, 150-165.
3. В.Я. Павилайнен, М.С. Сайкова. Критические параметры устойчивости и расслоения в двухслойном кольце при температурных воздействиях // *Вестник СПбГУ*. 2006. Вып.2. 125-134.
4. А.Н. Полилов, О.Ю. Склемина. Модели расслоения композитных пластин и сосудов давления с потерей устойчивости слоёв // *Машиностроение и инженерное образование*. 2023, Т. 1, Вып. 3, 9-22.

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ И КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ**

Саврай Р. А.

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

В обзорном докладе представлены результаты исследования особенностей разрушения при циклическом растяжении стали У10 с перлитными структурами различного типа (грубопластинчатый перлит, тонкопластинчатый перлит, отожженный тонкопластинчатый перлит, частично сфероидизированный перлит). Выявлено, что циклическое растяжение стали У10 сопровождается структурными изменениями, характер которых существенно зависит от типа перлитной структуры. Показано, что наибольшей усталостной долговечностью при циклическом растяжении обладают те структуры, которые оказываются способными претерпевать изменения в процессе нагружения. Рассмотрено влияние градиентного упрочненного слоя, сформированного с помощью фрикционной обработки скользящим индентором, на контактную выносливость стали У10 со структурой тонкопластинчатого перлита. Показано, что в условиях контактно-усталостного нагружения градиентный упрочненный поверхностный слой повышает контактную выносливость стали, и что на эффективность повышения контактной выносливости оказывает влияние толщина данного слоя. Установлены факторы, отрицательно влияющие на контактную выносливость и их взаимосвязь с технологическими параметрами фрикционной обработки. Продемонстрирована эффективность способа оценки контактной выносливости тонких упрочненных поверхностных слоев, заключающийся в проведении контактно-усталостных испытаний по схеме пульсирующего неударного контакта «шар-плоскость» в условиях повторяющегося упругопластического деформирования с различной максимальной нагрузкой.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО БОРИДНОГО ПОКРЫТИЯ НА СТАЛИ 4Х5МФС

Быкова Т. М.<sup>1</sup>, Пугачева Н. Б.<sup>1</sup>, Сирош В. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия, [nat@imach.uran.ru](mailto:nat@imach.uran.ru), [tatiana\\_8801@mail.ru](mailto:tatiana_8801@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, 18, Софьи Ковалевской. Екатеринбург, 620108, Россия, [sirosh.imp@yandex.ru](mailto:sirosh.imp@yandex.ru)

Эксплуатационные свойства изделий машиностроения во многом определяет состояние их поверхностного слоя, поскольку именно поверхность подвергается воздействию контактного нагружения и износу. Преимуществом низкотемпературного метода нанесения боридного покрытия является формирование пластичных однофазных слоев ( $Fe_2B$ ) и отсутствие игольчатого строения. [1]

Низкотемпературное диффузионное покрытие было нанесено на штамповую сталь марки 4Х5МФС при температуре 620 °С и выдержкой 6 часов. Микротвердость изучена на инструментальном микротвердомере системы Fischerscope HM2000 XUm при нагрузке 0,049 Н. Испытания на износ проводились на лабораторной установке по схеме «палец-пластина». Нормальная нагрузка при испытаниях составляла 50 Н. Путь трения для образцов составляет 160 м. Микроструктуру покрытия до и после испытаний исследовали на сканирующем микроскопе TESCAN с ЭДС приставкой OXFORD и в режиме дифракции отражённых электронов с помощью программного комплекса к приставке Oxford Nklnordlysft+.

В структуре полученного борированного слоя игольчатое строение отсутствует, покрытие состоит из боридов железа ( $Fe_2B$ ) микротвердостью 800 HV 0.05 и боридов хрома ( $Cr_2B$  и  $Cr_3B_4$ ) микротвердостью 550 HV 0.05 (рис. 1). Толщина покрытия составляет 20 мкм. После испытаний в покрытии наблюдается пластическая деформация зерен  $Fe_2B$ , при этом микротрещин и сколов в поверхностном слое не обнаружено, что обуславливает отличия в характере разрушения от традиционного боридного покрытия, имеющего игольчатое строение. [2]. По значению коэффициента трения сталь с боридным покрытием следует отнести к антифрикционным материалам:  $f_{mp} = 0,1 - 0,14$ . Определенный запас пластичности боридов приводит к их сминанию и растиранию по поверхности стали 4Х5МФС. Исследования выполнены по государственному заданию (тема № 124020700063-3).

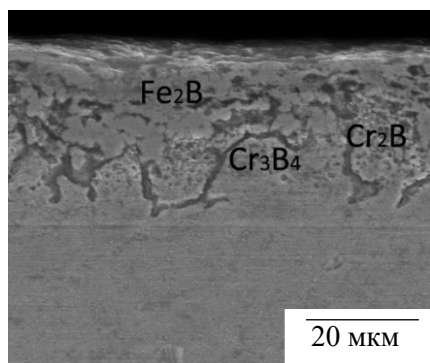


Рис. 1. Микроструктура низкотемпературного боридного покрытия стали 4Х5МФС

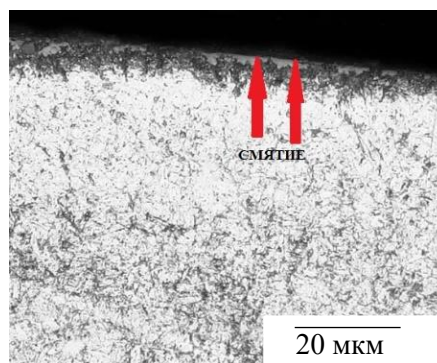


Рис. 2. Микроструктура покрытия после испытания на износ по схеме «палец-пластина»

## Литература

1. Пугачева Н.Б., Быкова Т.М. Исследование методов борирования, анализ структуры и свойств получаемых покрытий. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2020. № 2. С. 38-60.
2. Пугачева Н.Б., Быкова Т.М. Влияние элементов основы на состав и свойства диффузионных боридных покрытий. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2014. № 1(62). С. 46-53.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА ПРЕССОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ**

Швейкин В. П.<sup>1,2</sup>, Калинина Н. А.<sup>1,3</sup>, Разинкин А. В.<sup>3</sup>, Мальцева Т. В.<sup>2,3</sup>, Салихьянов Д. Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки *Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

<sup>3</sup>Открытое Акционерное Общество «Каменск-Уральский металлургический завод», 5, ул. Заводская, Каменск-Уральский, 623405, Российская Федерация  
*kalinina\_na@mail.ru*

Сопротивление пластической деформации – реологическая характеристика металлов и сплавов, определяющая энергосиловые параметры процессов обработки металлов давлением и характер течения металла, в частности, распределение деформации по объёму заготовки при её формоизменении.

Данные о сопротивлении деформации в виде кривых упрочнения в зависимости от степени, скорости и температуры деформирования необходимы для расчётов конкретных технологических процессов ОМД и для компьютерного моделирования этих процессов. Сопротивление деформации принято определять при одноосном напряжённом состоянии металла.

Цель проведения пластометрических испытаний - исследование влияния изменения структуры и механических свойств при различных температурах отжига в технологическом процессе прессования прутков из алюминиевых сплавов АД33 и Д16 на их деформационное поведение. В частности, поставлена задача изучения деформационного поведения указанных алюминиевых сплавов при комнатной температуре и температуре прессования (для АД33 температура прессования составляет 500 °С, для Д16 – 480 °С) в зависимости от температуры отжига после 1 прохода прессования.

Согласно полученным кривым течения сплава Д16 при температуре прессования 480 °С и скорости деформации  $\xi = 1 \text{ с}^{-1}$  отмечено, что при температуре 520 °С значения сопротивления деформации имеют наибольшие значения, тогда как наименьшие значения сопротивления деформации  $\sigma_s$  соответствуют отжигу при температуре 390 °С. Та же тенденция наблюдается у сплава АД33. При этом изменение температуры отжига в диапазоне 350-390 °С практически не оказывает влияния на сопротивление деформации сплава АД33.

# УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ПУЛТРУЗИОННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ МНОГООСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Елкин А. С.<sup>1</sup>, Староверов О. А.<sup>2</sup>, Абрамова В. В.<sup>1</sup>, Сергеичев И. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий, д. 30 стр.1, Большой бульвар, г. Москва, 121205, РФ, [aleksandr.elkin@skoltech.ru](mailto:aleksandr.elkin@skoltech.ru).

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, РФ.

Пултрузионные стеклопластики широко применяются в качестве конструкционных материалов для строительства объектов дорожной инфраструктуры, зданий и т.д. Поэтому определение усталостных свойств этих материалов является необходимой задачей для оценки долговечности конструкций особенно при воздействии комбинированных нагрузок. В данной работе показаны результаты экспериментального исследования статических и усталостных характеристик пултрузионных стеклопластиков при одноосном и многоосном нагружении. С помощью машины Instron 8801 и системы корреляции изображений (DIC) определены упругие и прочностные характеристики материала. Все испытания проводились на трубчатых образцах для возможности создания сложного напряженного состояния одновременным растяжением/сжатием и кручением. По результатам испытаний предложен критерий статической и усталостной прочности. Определено, что только при сдвиге более 70% (от максимальной прочности на сдвиг) заметно снижается усталостная прочность пултрузионного стеклопластика, что вероятно связано с внутренней структурой материала. С помощью конечно-элементного моделирования и экспериментальных данных определена истинная долговечность пултрузионного стеклопластика. Результаты испытаний представлены на рис 1. и рис.2.

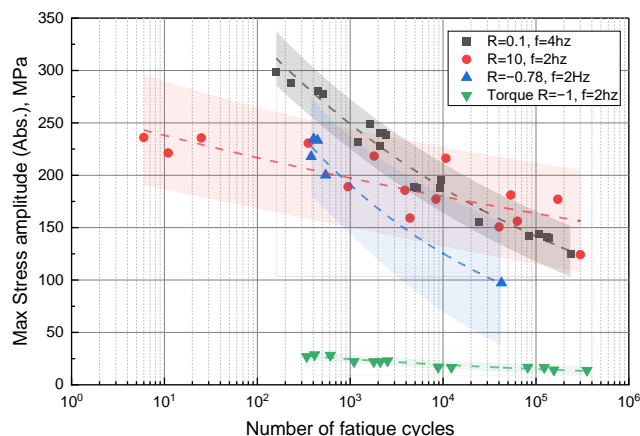


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний при простом нагружении (растяжение, сжатие, кручение)

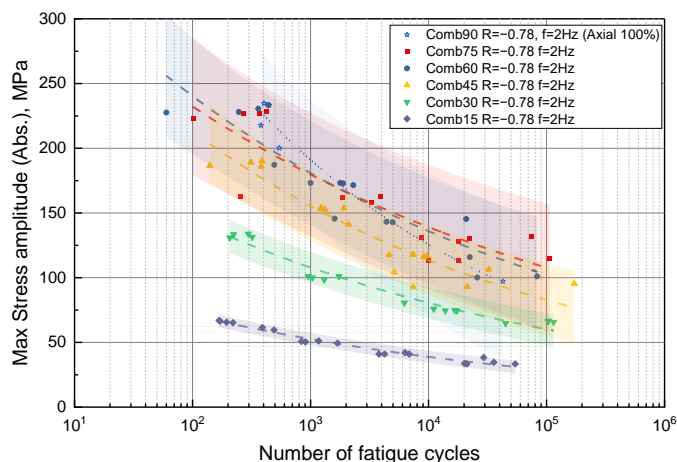


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний при многоосном сложном нагружении (растяжение/сжатие+ кручение)



# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ УСТАЛОСТНОГО И ФРИКЦИОННОГО МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Петрова И. М.

ИМАШ РАН, 4, М. Харитоньевский пер., Москва, 101000, Россия. ([impetr@mail.ru](mailto:impetr@mail.ru))

Значительный парк изделий машиностроения работает при динамическом нагружении, когда износ и усталостные разрушения в большой степени определяют их работоспособность и надежность. При моделировании усталостной следует учитывать два режима разрушения (поверхностный при мало и многоциклового усталости и внутренний при гигацикловой усталости) и тенденцию к дальнейшему снижению предела усталости для долговечностей превышающих  $10^7$  циклов. В этих условиях требуемый уровень надежности и долговечности механических систем, находящихся в эксплуатации, должен быть рассмотрен с учетом условий нагружения и степени влияния сопутствующих эксплуатационных факторов, особенно износа, на накопление повреждений. В работах [1,2] показано, что в зоне фрикционного контакта элементов трибосопряжений реализуется накопление повреждений, соответствующее малоциклового и многоциклового усталости. Траектория износа, как усталостного разрушения поверхностного слоя, сближает задачи триботехники с задачами оценки накопления повреждений в конструкционных материалах при динамическом нагружении.

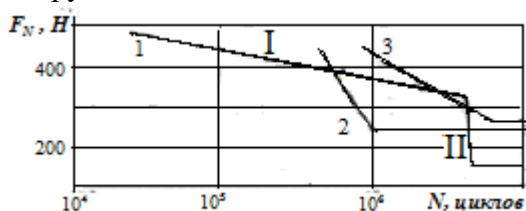


Рис. 1. Кривые фрикционной усталости: 1 без изгиба; 2, 3 фрикционно механической усталости с изгибом (2-  $\sigma_n=160$ МПа), (3-  $\sigma_n=50$ МПа)

Усталостный характер накопления повреждений, зафиксированный при испытании на моделях фрикционного контакта, подтверждают экспериментально полученные в работе [3] кривые усталости (рис. 1): где  $F_N$  (Н)- контактная нагрузка;  $N$  число циклов до наступления предельного состояния по критерию износа. На рис. 1: (I)- область малоциклового усталости примерно до  $4,2 \cdot 10^6$  чисел циклов; (II) – область многоциклового усталости, расположенная почти вертикально, откуда следует,

что наибольшее влияние на накопление усталостных повреждений при трении оказывает малоциклового усталости.

В этом случае суммарное повреждение  $D$  может быть записано уравнением

$$D = \sum_{i=1}^k N_{iэ} / [N]_i$$

где  $k$  — число режимов нагружения, включая мало, много и гигацикловую усталость, трение и возможные другие внешние воздействия;  $N_{iэ}$  — число циклов нагружения на  $i$ -м режиме в эксплуатации с напряжением  $\sigma_{aiэ}$  или с деформациями  $\epsilon_{aiэ}$ ;  $[N]_i$  — допустимое число циклов нагружения, определяемое по кривым усталости по напряжениям или деформациям.

Полученные результаты показали возможность использования данного подхода к оценке вероятности разрушения элементов механических систем [2].

## Литература

1. Е.А. Марченко О природе разрушения поверхности металлов при трении. М.: Наука, 1979, 118 с
2. Петрова И.М., Марченко Е.А., Хрущев М.М., Буяновский И.А. Структурные и функциональные закономерности накопления повреждений и разрушения металлов при динамическом нагружении и износе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023, том 89. № 10. С. 74-82
3. А.В. Богданович, О.М. Еловой, И.Н. Лис, Ю.А. Головченко. Экспериментальное исследование закономерностей обратного эффекта сталь 45 – силумин при фрикционно-механической усталости. Трибофатика Труды VI МСТФ2010, часть 1, с. 527-532

# ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗОНЫ ПЛАСТИЧНОСТИ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Прокопьев Л. А.<sup>1</sup>, Андреев Я. М.<sup>1</sup>, Семёнов С. О.<sup>1</sup>, Лукин Е. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН, д.2, ул. Петровского, г. Якутск, 677000, Российская Федерация, l.prokopyev@yandex.ru

<sup>2</sup> ИФТПС СО РАН, д.1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677000, Российская Федерация, lukines@iptpn.usn.ru

С современной точки зрения, проблема хладостойкости конструкционных сталей связана с изменением физико-механических свойств материала при низких температурах, в частности, с переходом от вязкого разрушения к хрупкому. Это приводит к снижению поглощенной энергии при ударе, увеличению склонности к формированию трещин и снижению предела пластичности. Основные факторы, влияющие на хладостойкость конструкционных сталей, включают химический состав стали, микроструктуру, наличие неметаллических включений, концентрацию напряжений, скорость нагружения и т. д.[1, 2]

Современные исследовательские работы в области хладостойкости конструкционных сталей направлены на изучение возможности создания новых сплавов и материалов с улучшенными свойствами для эксплуатации в холодных условиях, а также разработку новых методов неразрушающего контроля, позволяющих оценивать хладостойкость стали. Прогресс в этой области требует комплексного подхода, включающего в себя не только исследование и внедрение новых материалов, но и разработку новых стандартов оценки хладостойкости[3, 4].

В рамках исследования критериев, характеризующих хладоломкость материала, рассмотрен параметр в виде отношения расчётного радиуса зоны пластичности при минимальной температуре эксплуатации к расчётному радиусу зоны пластичности при стандартных условиях. Данный параметр вычислен для плоско-деформированного напряжённого состояния, для двух схем нагружения образца в виде пластины с боковым надрезом из различных материалов, в диапазоне температур (-60°C .. 20°C). Схема нагружения №1 соответствует равномерному растяжению, схема нагружения №2 – линейно распределенной нагрузке. Вычисления радиуса производились по линии продолжения трещины, с использованием критерия Мизеса и стандартных уравнений линейной механики разрушения. Зависимость приведённых значений данного параметра от температуры показана на рисунке 1. Характерной особенностью рассматриваемого параметра, как видно из рисунка 1, является его инвариантность к схеме нагружения при широком диапазоне температур. Выявленные зависимости могут быть использованы для разработки новых критериев хладостойкости материалов.

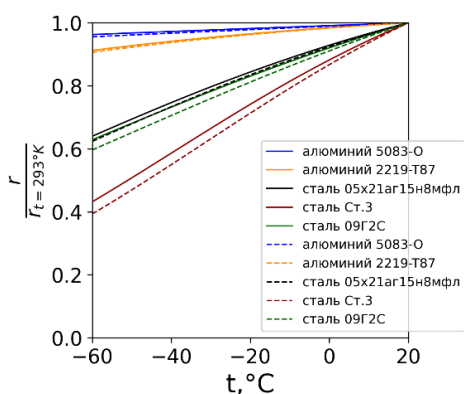


Рис. 1. График приведённых значений радиуса зоны пластичности от температуры. Сплошные линии: схема нагружения №1, пунктирные – схема нагружения №2

## Литература

1. Л.Г. Петрова. Металловедческая экспертиза разрушений конструкций по причине хладоломкости: исторический обзор // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2022. №2 (3). с.29-46.
2. А.В. Сибилев, В.М. Мишин. Характеристики локального разрушения порошковой стали в зависимости от температуры и пористости // Вестник российских университетов. Математика. 2013. №4-2. с.1643-1647.
3. В.М. Корнев. Охрупчивание материала стальных конструкций при низких температурах и катастрофическое разрушение // Физ. Мезомех. 2018. №2. с.45-55
4. Панин В.Е., Дерезягина Л.С., Лебедев М.П., Сыромятникова А.С., Сурикова Н.С., Почивалов Ю.И., Овечкин Б.Б. Научные основы хладоломкости конструкционных сталей с ОЦК кристаллической решеткой и деградации их структуры при эксплуатации в условиях отрицательных температур // Физ. мезомех.. 2016. №2. с.5-16.

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРЕГРАДЫ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Двойников Д. А.<sup>1</sup>, Залазинский А. Г.<sup>1</sup>, Нестеренко А. В.<sup>1</sup>, Швейкин В. П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, д.34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, dm.dvoynikov@mail.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация, shveikin60@mail.ru

Предложена конструкция комбинированной преграды, состоящей из металлических слоёв пластически деформируемых лёгких сплавов и термопластичного полимера, для защиты изделий от интенсивных ударных воздействий динамических объектов. В конструкцию комбинированной преграды включены: отражающий слой, промежуточный пористый слой, слой, задерживающий осколки, и другие продукты взаимодействия динамических объектов с преградой. Наличие в структуре комбинированной преграды пористого слоя придаёт ей демпфирующие свойства и позволяет существенно снизить запреградные нагрузки на защищаемые изделия. При этом значительная доля кинетической энергии удара поглощается за счёт работы уплотнения пористого слоя [1, 2].

Для решения задач проектирования комбинированной преграды слоистого строения разработан программный комплекс, включающий в свой состав систему автоматизированного инженерного анализа, а также программы искусственного интеллекта, реализующие методы нейросетевого моделирования и многокритериальной оптимизации [3, 4]. Показано применение программного комплекса для имитационного моделирования, вычислительных экспериментов и прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети процессов интенсивного ударного взаимодействия комбинированной преграды с динамическими объектами. Для повышения живучести и надёжности комбинированной преграды сформулирована и решена задача многокритериальной оптимизации её конструкции. Применение программного комплекса позволяет существенно (>10 раз) снизить запреградные нагрузки на защищаемые изделия.

Выполненные исследования демпфирующих свойств комбинированной преграды при ударных нагрузках содержат новые научные результаты и значимы для теории и практики усиления защиты машин и оборудования от интенсивного ударного воздействия.

Полученные результаты имеют высокий потенциал применения в практике проектирования современной техники, что соответствует Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации № 642 от 1 декабря 2016 г.

## Литература

1. Ю.А. Михайлин. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006, 624 с.
2. В.В. Баландин, А. М. Брагов, С. В. Зефилов, А.К. Ломунов. Экспериментальное и численное исследование ударного взаимодействия жёсткого ударника с комбинированной преградой. Физика горения и взрыва, 2017, т. 53, №1, 129-134.
3. В.Г. Титов, А.Г. Залазинский, Д.И. Крючков, Нестеренко А.В. Многокритериальная оптимизация методом «идеальной точки» состава сырья для изготовления композитной заготовки. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2019, №2, 49-56.
4. D. A. Dvoynikov, S. V. Gladkovsky, A. G. Zalazinsky, V. G. Titov, and V. P. Shveikin. Prediction of the high structural strength of system-alloyed maraging steels using neural-network modeling. Metallurgist, May, 2023, Vol. 67, Nos. 1-2, 249-255.

# ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ЭПОКСИДНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ РАДИАЛЬНОМ СЖАТИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ПРИ МИНУСОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Смирнов С. В.<sup>1</sup>, Веретенникова И. А.<sup>1</sup>, Вичужанин Д. И.<sup>1</sup>, Пестов А. В.<sup>2</sup>, Роговая С. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия

<sup>2</sup>Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, д. 22/20, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Россия  
stpxia@gmail.com

Наличие границы соединения разнородных материалов в слоистых металлополимерных композитах [1] и проблемы с прогнозированием ее поведения при различных внешних нагрузках сдерживают широкое применение этих материалов. В настоящее время отсутствует единое представление о том, по каким критериям следует оценивать прочность подобных соединений, какой способ испытания применять и какие характеристики напряженного состояния при этом использовать. В данной работе предложено для этих целей использовать brazilian disc test, введенный [2,3] и представляющий собой радиальное сжатие цилиндрического образца. Преимущество этого метода заключается в том, что любая комбинация напряжений отрыв/сдвиг может быть достигнута с помощью соответствующего выбора угла между направлением сжатия и плоскостью клеевого соединения.

Изучали прочность соединений образцов из алюминий-магниевого сплава АМг5. Клеевые композиции были изготовлены на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Для изготовления образцов прутки диаметром 20 мм делили на шайбы толщиной  $20 \pm 0,2$  мм. Затем шайбы разрезались пополам в меридиональной плоскости и подготовленные половинки склеивали эпоксидной композицией. Толщина клеевого слоя в каждом соединении составляла  $0,2 \pm 0,02$  мм. При установке образцов между плоскими бойками испытательной машины угол  $\alpha$  между направлением сжатия и плоскостью клеевого соединения варьировали в диапазоне от 2 до 20 градусов. Испытания образцов проводили на универсальной испытательной машине Instron 8801 в климатической камере при температуре - 50°C. В результате испытаний были получены образцы с разрушившимся клеевым слоем. Для понимания процесса, происходившего в испытаниях, провели подробное исследование образовавшихся поверхностей после разрушения.

В результате было показано, что разрушение материалов по механизму чистого расслоения не наблюдается ни в одном из экспериментов. Разрушение соединения АМг5/эпоксидная смола при нагружении происходит по смешанному механизму. При минусовых температурах эпоксидная прослойка разрушается по хрупкому механизму. Для прогнозирования разрушения для подобных соединений нельзя однозначно использовать теорию адгезионного или когезионного разрушения, необходимо рассматривать модель смешанного разрушения, которая бы учитывала комбинацию данных двух процессов. При обработке результатов экспериментов лучше использовать расчетную модель выделенного микрообъема, включающего границу соединения и прилегающие слои субстрата и адгезива, по аналогии с моделью, приведённой в статье [4].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00528).

## Литература

1. S. Budhe, M.D. Banea, S. de Barros, L.F.M. da Silva // *An updated review of adhesive bonded joints in composite materials, International Journal of Adhesion & Adhesives*, 72 2017. 30–42
2. F. Carneiro, A. Barcellos // *Resistance a la traction des betons, Bull RILEM I*, 13 1953. 97–108
3. T. Akazawa // *Tension test method for concrete, Int Assoc Test Res Lab Mater Struct*, 16 1953. 13–23
4. S. Smirnov, D. Konovalov, D. Vichuzhanin, I. Veretennikova, A. Pestov, V. Osipova // *The Effect of the Stress State, Testing Temperature, and Hardener Composition on the Strength of an AlMg5/Epoxy Metal-Polymer Joint, Materials*, 15:20 2022. 7326

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛИ 13X11H2B2MB-Ш

Ганеев А. В.<sup>1</sup>, Хайбулина Н. А.<sup>1</sup>, Фрик А. А.<sup>1</sup>, Никитина М. А.<sup>1</sup>,  
Исламгалиев Р. К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» дом 32, ул. Заки Валиди,  
г. Уфа, 450076, Россия, artur\_ganeev@mail.ru

Склонность к хрупкому разрушению – важная характеристика сталей, зависящая от состава, структуры и технологии получения. Для её оценки на основе результатов ударных испытаний строят кривые температурной зависимости ударной вязкости. Испытание на ударный изгиб проводят с целью оценки склонности металла к хрупкому разрушению. Ударная вязкость (КС) оценивается как частное от деления работы удара к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора.

По температурной зависимости ударной вязкости оценивают склонность материала к хрупкому разрушению. Это определяют при визуальном осмотре структуры излома образцов. В одном случае вязкая область локализуется в очаге разрушения, образуя вязкую зону, в другом случае хрупкая область локализуется центральной части излома, образуя так называемый «хрупкий квадрат». Стандартами предписывается измерение «доли хрупкого излома» в %: отношение площади хрупкого квадрата ко всему сечению образца [1]. При этом существуют и другие подходы оценки вязкости: величина уширения при выбеге трещины [2] локальный геометрический анализ вязкого разрушения [3].

Более точное представление об изменении характеристик на различных стадиях ударного изгиба дает диаграмма нагружения, записанная в процессе испытания. По диаграмме ударного деформирования можно оценить нагрузки, соответствующие началу общей текучести, максимума, начала нестабильного хрупкого разрушения и затупления трещины. Полученные данные позволяют оценить работу зарождения и распространения трещины, что необходимо для построения температурных зависимости полной работы разрушения и динамической трещиностойкости, а также критической температуры хрупкости [4].

В данной работе исследовано влияние структуры жаропрочной высоколегированной стали 13X11H2B2MB-Ш после различной деформационно-термической обработки (ДТО) на значения ударной вязкости. Испытания проводились на системе с падающим грузом для измерения параметров ударных испытаний (вертикальный копер) Instron CEAST 9350 с записью диаграммы нагружения на образцах с V-образным надрезом в интервале температур от – 60° до 120°С. Структура изломов образцов была анализирована на сканирующем электронном микроскопе JSM 6490 без предварительной обработки. По результатам определена температура хрупко- вязкого перехода для каждого вида ДТО. Определение работы зон распространения и зарождения трещин оценивали методикой Ботвиной [4] по макроструктуре изломов и диаграммам ударного деформирования.

Полученные результаты показывают высокую корреляцию между различными методами оценки характера и величины энергии удара и работы разрушения. Работа зарождения трещины во всем температурном диапазоне испытаний остается практически постоянной и не зависит от морфологии структуры стали 13X11H2B2MB-Ш. Работа распространения трещины имеет ярко выраженную температурную и структурную зависимость и изменяется в 7 раз от вида ДТО.

### Литература

1. Штремель М.А. Возможности фрактографии MiTOM, 2005, №5, С. 25–31.
2. Штремель М.А. Информативность измерений ударной вязкости, MiTOM, 2008, № 11. С. 37–51
3. А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, С.В. Скородумов В.А. Траченко и др. Развитие процедур измерения неоднородности структур и разрушения (по геометрии излома) для классификации сталей по вязкости, Вектор науки ТГУ, 2013, №3, С.198-201.
4. Ботвина Л.Р., Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности, Изд-во Наука, 2008, 334с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ВТ6 В ПРИ КВАЗИСЛУЧАЙНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Бадиков К. А.<sup>1</sup>, Савкин А. Н., Абалхан Д. Ю., Сенцов К. И.

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет, 28, пр. Ленина, Волгоград, 400005, Россия, badikov\_kirill@mail.ru

Исследована кинетика роста усталостной трещины в титановом сплаве ВТ6 ( $\alpha+\beta$  структура) при внешнем квазислучайном циклическом нагружении различного вида. Была проведена термическая обработка образцов для формирования глобулярной и пластинчатой структуры сплава ВТ6, отличающиеся по механическим характеристикам. Для испытаний на распространение трещины было использована сервогидравлическая машина Biss-Nano 25. Использовались компактные образцы типа С(Т) толщиной 5 мм, изготовлены из листового проката. Предварительное растрескивание для всех испытаний проводилось с параметрами:  $P_{max}=3$  кН,  $R=0.1$ ,  $a_0=14$  мм. Для фиксирования размеров трещины в режиме реального времени использовался датчик раскрытия трещины.

Использовались модифицированные спектры квазислучайного нагружения, полученные на основе: MTW (miniTWIST), соответствующий нагружению крыла транспортного самолета, MFS (miniFALSTAFF) – нагружение крыла боевого истребителя, Saetrans – нагружение подвески автомобиля. Продолжительность укороченной версии спектров составляла 5000 циклов.

Различие спектров нагружения для программных испытаний оцениваются по ГОСТ 25.507-85 с помощью меры полноты спектра  $V$ . Оценив характер нерегулярного нагружения и рассмотрев экспериментальные кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР), можно отметить, что на расположение этих кривых в многом определяется величиной  $V$ . Чем меньше величина  $V$  для спектра нагружения при постоянной максимальной нагрузке, тем скорость роста трещины меньше и продолжительность ее выше. Для регулярного нагружения  $V=1$  [1].

Во всех испытаниях максимальное нагружение  $P_{max}$  составляло 6 кН. Коэффициенты асимметрии нагружения для всех испытаний составили  $R=0.01$ . При испытаниях и прочих равных условиях с  $R=0.01$  наибольшим повреждающим воздействием для глобулярной структуры служит спектр MTW с долговечностью  $N = 220000$  циклов. Для пластинчатой структуры – спектр Saetrans, долговечность роста трещины с которым составила  $N = 527436$  циклов. Следует заметить, что все используемые спектры при  $R=0.01$  показали меньшую долговечность для глобулярной структуры по сравнению с пластинчатой, что в первую очередь связано с большей прочностью глобулярной структуры по сравнению с пластинчатой.

Экспериментальные КДУР при переменном нагружении сплава ВТ6 с разным структурным состоянием показали, что оно влияет в первую очередь на изменении коэффициента  $C$  кривых КДУР. Так для глобулярной структуры значение коэффициента уравнения Пэриса  $C = 4.1 \cdot 10^{-13}$ , а пластинчатой  $C = 1.6 \cdot 10^{-13}$ . Угол наклона кривых КДУР был примерно одинаковым и равен  $n = 3.35$ .

Исследование полученных КДУР позволяет выделить следующее:

- 1 - КДУР для исследуемых спектров нагружения для разных структур эквидистантны.
- 2 - КДУР для кривых роста трещин с наибольшей продолжительностью расположены ниже других кривых с большей интенсивностью роста.

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (РНФ), проект 23-79-01269.*

## Литература

1. Савкин, А.Н. Оценка влияния характера нагружения и силовых параметров случайного внешнего воздействия на рост усталостной трещины в низколегированной стали / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 7. – С. 40-45.

# ВЛИЯНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ВОЛОКОН НА НЕЛИНЕЙНОСТЬ ПРОДОЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ КОМПОЗИТА

Федулов Б. Н., Бондарчук Д. А., Ломакин Е. В.

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, Главное здание, механико-математический факультет. (fedulov.b@mail.ru, bondarchuk.da@mail.ru, evlomakin@yandex.ru )

Исследовано влияние начальной волнистости волокон на прочностные и жесткостные характеристики полимерного композитного материала. Проверена гипотеза о влиянии остаточных напряжений, возникающих в процессе производства композита, на рост волнистости волокон композитного материала. Был разработан вычислительный подход, основанный на использовании специальной ячейки периодичности, содержащей необходимую волнистость армирующих волокон. Полученные результаты объясняют разницу в жесткости, наблюдаемую в однонаправленных композитах в продольном направлении при одноосном растяжении и сжатии.

На рисунке 1 показаны диаграммы продольного сжатия, полученные численно для композитного материала при различной начальной волнистости.

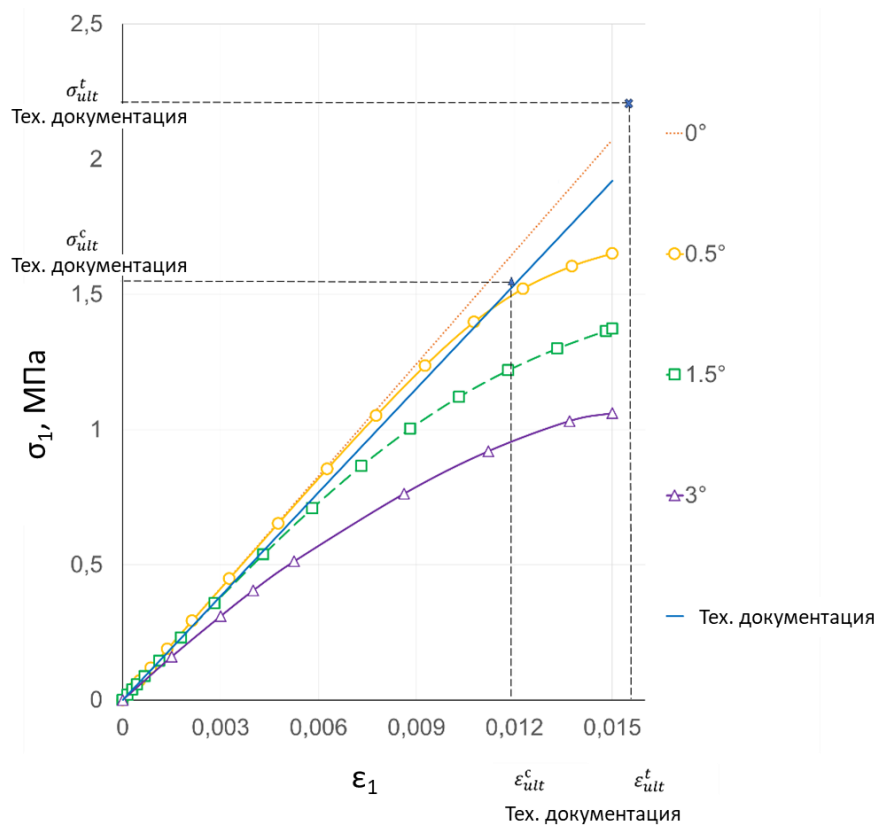


Рис. 1. Диаграммы сжатия композитного материала при различной начальной волнистости

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-11-20230-Р

## Литература

1. Fedulov B., Bondarchuk D., Lomakin E. Longitudinal elastic nonlinearity of composite material // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2024. – T. 18. – №. 67. – С. 311-318.
2. Lomakin E. V., Fedulov B. N. Nonlinear anisotropic elasticity for laminate composites // *Meccanica*. – 2015. – T. 50. – С. 1527-1535.
3. Lomakin E. V., Fedulov B. N., Melnikov A. M. Constitutive models for anisotropic materials susceptible to loading conditions // *Mechanics and model-based control of advanced engineering systems*. – 2014. – С. 209-216.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ КОНСТАНТ И ТОЛЩИНЫ МЕЖФАЗНОЙ ЗОНЫ В СТЕКЛОПЛАСТИКАХ НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ И МАКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Смирнов А. С.<sup>1</sup>, Смирнова Е. О.<sup>1</sup>, Спирина И. А.<sup>1</sup>

*Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия, smirnov@imach.uran.ru*

Снижение веса конструкций путем использования материалов с высокой удельной прочностью является современной тенденцией исследований, направленных на повышение энергоэффективности транспортных средств. В связи с этим большое распространение в авиационной промышленности получили полимерные композиционные материалы, армированные высокопрочными волокнами. Как правило в качестве армирующих волокон используются волокна, изготовленные из стекла, углерода, керамики, арамида, а также из натуральных материалов. Наибольшее распространение получили полимерные композиты, армированные стеклянными и углеродными волокнами. В полимерноматричных композитах важное значение имеет матрица, поскольку она передает нагрузки на волокна и распределяет напряжения между ними, а также отвечает за защиту волокон от воздействия окружающей среды и влияет на их расположение.

В процессе полимеризации матрицы появляется межфазная зона между волокном и матрицей. Она, как правило, существенно отличается от матричной фазы по составу, поскольку образуется в результате взаимодействия с аппретом, замасливателем и другими низкомолекулярными включениями связующего и поверхности наполнителя. Структурные отличия, обусловленные влиянием наполнителя, проявляются в одних случаях изменением степени отверждения, в других – степени кристаллообразования прилежащего полимера. Межфазная зона выполняет передачу напряжений от матрицы к волокну, а следовательно, играет важную роль в передаче напряжений между самими волокнами и имеет значительное влияние на механические свойства композитов. При этом прочное соединение между волокном и матрицей приводит к достижению высокой жесткости и прочности, в то время как относительно слабое межфазное соединение обычно улучшает характеристики поглощения энергии в условиях удара. В связи с этим отсутствие учета межфазной зоны в моделях полимерных композитов может приводить к некорректным результатам, связанных с прогнозированием разрушения конструкций в условиях внешних механических воздействий.

Данная работа направлена на описание методики определения упругих констант и толщины межфазной зоны в стеклопластиках на основе макро- и микромеханических испытаний. Макромеханические испытания проводились путем растяжения однонаправленного стеклопластика вдоль и поперек укладки волокон. Микромеханические испытания проводились с использованием растяжения единичных стекловолокон и кинетического микроиндентирования в матрицу и стекловолокно.

На основании проведенных экспериментов были построены конечно-элементные модели монослоя стеклопластика, в которых явным образом учитывалась матрица, межфазная зона и волокна. В результате было установлено, что модуль упругости, коэффициент Пуассона и толщина межфазной зоны составили 12.7 ГПа, 0.07 и 0.68 мкм соответственно. Полученные данные были верифицированы на основе экспериментов по растяжению перекрестноармированного четырнадцатислойного стеклопластика.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-29-00703.*



# АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЛЬСОВ ШЛИФОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ ГЛУБИНЫ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Шляхтенков С. П.<sup>1</sup>, Бехер С. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения 191, ул. Дуси Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, Россия, E-mail: [shlyakhtenkow@gmail.com](mailto:shlyakhtenkow@gmail.com)

Процессы зарождения и интенсивность развития контактно-усталостных дефектов являются одними из важнейших факторов, определяющих срок службы рельсов. Более 50 % от всех изъятий рельсов из эксплуатации происходит по контактно-усталостным дефектам [1]. Тенденция перехода рельсов в остродефектное состояние по данным видам дефектов демонстрирует сложившийся запрос на научно-технические решения, направленные на повышение ресурса железнодорожного пути, показателей надежности и безотказности рельсов.

Обнаружение поверхностных трещин головки рельсов и оценка их параметров осуществляется с помощью различных методов неразрушающего контроля (НК), в том числе вихретокового, ультразвукового. Преимуществом вихретокового метода контроля (ВТК) является непосредственная связь информативных параметров выходных сигналов вихретокового преобразователя (ВТП) с глубиной трещин – одной из главных характеристик степени повреждения рельсов. Наиболее оптимальным способом профилактики развития трещин рельсов является технология их шлифовки. В настоящее время входной и выходной контроль рельсошлифования в части устранения поверхностной сетки трещин, а также мониторинг повреждаемости поверхности катания контактно-усталостными трещинами не проводится.

Целью работы является анализ эффективности технологии и режимов рельсошлифования в части удаления контактно-усталостных трещин головки рельсов на основе измерения их глубины вихретоковым методом.

Экспериментальные исследования проводились на эксплуатирующемся участке железнодорожного пути при проведении шлифования рельсов машиной РШП-048. Участок пути является бесстыковым, двухпутным перегонном, имеющим две круговые кривые радиусами 617 м и 1030 м и длиной 480 м и 240 м соответственно. ВТК проводился дефектоскопом Вектор-60Д до и после каждого прохода рельсошлифовального поезда в заранее выбранных участках поверхности катания рельсов с наиболее выраженной сеткой микротрещин в наружной и внутренней нитях пути. Для настройки дефектоскопа использовали образец головки рельса с реальной трещиной глубиной 1 мм, рабочая частота составила 100 кГц. При сканировании на длине  $(200 \pm 10)$  мм фиксировали амплитуду и фазу первичных сигналов ВТП от каждой трещины. Глубину трещин оценивали косвенным методом, описанным в предыдущих исследованиях [2]. Далее проводился сравнительный анализ изменения глубины и линейной плотности на единицу длины контактно-усталостных трещин с учетом доверительных границ погрешности использованного метода измерения.

Наибольшее изменение количества дефектов и их размера наблюдается на наружной нити. Результаты измерения глубин трещин в целом согласуются с результатами измерений профиля рельса, толщина снимаемого слоя численно равняется изменению глубины трещин, с учетом допускаемой степени разброса экспериментальных данных ( $\pm 0,12$  мм). По результатам измерения профиля рельса шлифование машиной РШП-48 на 7 проходов обеспечило съем металла на глубину 0,10 – 0,22 мм. При этом по рабочей и не рабочей грани головки рельса величина съема металла составила 0,64 - 0,76 мм. Используемая методика ВТК обеспечивает измерение глубины трещин головки рельсов до 0,9 мм с погрешностью не более 0,12 мм. С учетом возможной толщины снятия металла до 0,25 мм шлифовальной машиной за один проход, неопределенность при планировании работ по рельсошлифованию при реализации данного способа ВТК составляет 1-3 прохода.

## Литература

1. Н.В. Кузнецова. Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2021. Т. 17. № 17. С. 41-47.
2. С.П. Шляхтенков, Д.Б. Некрасов, С.В. Палагин, О.В. Бессонова, А.А. Попков, С.А. Бехер, Дефектоскопия. 2023. № 4. С. 37-45.

# СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА AlSi10Mg, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Дымнич Е. М.<sup>1</sup>, Романова В. А.<sup>1</sup>, Зиновьева О. С.<sup>2</sup>, Балохонов Р. Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2/4, пр. Академический, город Томск, 634055, Россия, dymnich@ispms.ru*

<sup>2</sup>*School of Engineering and Technology, University of New South Wales Canberra, Buildings 16-21, Northcott Drive, Canberra*

Одной из основных проблем, препятствующих широкому использованию аддитивных технологий в производстве металлических изделий, является сложная связь между микроструктурой и механическими характеристиками конечных изделий [1, 2]. Сложная иерархическая структура, характерная для большинства аддитивных металлов и сплавов, делает их поведение трудно прогнозируемым с точки зрения существующих теорий. На сегодняшний день прогресс в исследовании таких материалов путем численного моделирования состоит в решении отдельно взятых задач: задач моделирования эволюции микроструктуры и задач по исследованию деформационного поведения материалов. Однако тесная связь технологических параметров, структуры, свойств и, в конечном итоге, характера деформационного поведения материала требует сопряжения этих двух задач, что до сих пор, оставалось нереализованной идеей. В этой связи, исследования в области разработки структурно-механической модели алюминиево-кремниевых сплавов, полученных методом селективного лазерного плавления, и численного анализа их деформационного поведения являются крайне привлекательными для разных областей науки и промышленности.

В рамках настоящей работы предложен двухступенчатый подход, включающий моделирование эволюции поликристаллической структуры сплава AlSi10Mg в процессе селективного лазерного плавления и последующий микромеханический анализ деформационного поведения полученной модели поликристалла. Математическая модель кристаллизации материала в процессе селективного лазерного плавления была разработана с использованием комбинированного подхода, включающего математическое описание эволюции температурных полей методом конечных разностей и имитационный метод клеточных автоматов для моделирования роста зерен [3]. Микромеханический анализ модельной микроструктуры проводился в рамках физической теории пластичности кристаллов.

Для изучения деформационного поведения сплава AlSi10Mg, полученного селективным лазерным плавлением, модельные структуры подвергались одноосному растяжению вдоль трех направлений. Анализ показал значительную анизотропию механических свойств на уровне зеренной структуры. Было установлено, что при одноосном растяжении материал находится в сложном напряженно-деформированном состоянии, в котором все компоненты тензора напряжений вносят сопоставимый вклад в деформационное поведение. Была продемонстрирована связь между кристаллографической текстурой и особенностями деформационного поведения исследуемого материала.

Исследование выполнено за счет проекта государственного задания ИФПМ СО РАН, FWRW-2021-0002.

## Литература

1. E.A. Kolubaev, V.E. Rubtsov, A.V. Chumaevsky, *Physical Mesomechics*. 2022, 25, p. 479–491.
2. Z. Jiang, J. Sun, F. Berto, X. Wang, G. Qian, *Physical Mesomechics*. 2023, 26, p. 367–390.
3. Zinoviev, O. Zinovieva, V. Ploshikhin, *Comput. Mater. Sci*. 2018, 141, p. 207–220.

# ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЛЮБОЙ ТОЧКЕ КОНСТРУКЦИИ И ВОКРУГ ОТВЕРСТИЙ ЗАДАННОЙ ФОРМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЩЕЛЕВОЙ РАЗГРУЗКИ

Чанышев А. И., Абдулин И. М., Белоусова О. Е., Лукьяшко О. А.

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 54, Красный проспект, Новосибирск, 630091, Россия, a.i.chanyshev@gmail.com*

Для определения напряженно-деформированного состояния в какой-либо фиксированной точке конструкции под нагрузкой предлагается произвести щелевую разгрузку вокруг этой точки (без разгрузки самой конструкции). Для этого предлагается нанести на ее поверхность очертания круга с применением кругового шаблона с центром в заданной точке, зафиксировать точки на обозначенной окружности, произвести щелевую нагрузку, измерить значения нормальных и тангенциальных смещений в граничных точках, построить граничные функции смещений, затем решить 2-ю краевую задачу теории упругости с заданными на границе смещениями. Для тех участков, в которых полученные напряжения превосходят пределы упругости, применяются уравнения теории пластичности в виде деформационной теории пластичности или теории пластического течения, по которым при известных напряжениях восстанавливаются упругопластические деформации с дальнейшим восстановлением в этих областях полных смещений по известным деформациям. Другой вариант, когда требуется определить напряженно-деформированное состояние вокруг отверстий заданной формы, отличается тем, что смещения (нормальные и тангенциальные) измеряются как с внутренней части щели, так и с наружной, при этом для очертания области применяется шаблон с границей, повторяющей контур отверстия. В этом случае для восстановления полных смещений вокруг отверстия заданной формы следует к смещениям, измеренным на внешней границе щели, добавить смещения с обратным знаком, измеренным на внутренней границе. По известным смещениям на границе и условию того, что контур отверстия свободен от напряжений находится напряженно-деформированное состояние в конструкции вокруг отверстия заданной формы путем решения задачи Коши [1].

В качестве иллюстрации приводится решение упругопластической задачи для плоскости с круговым отверстием и заданными на его границе смещениями [2, 3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00188).

## *Литература*

1. Шваб А. А. Некорректные статические задачи теории упругости // Изв. АН СССР. – Механика твердого тела. – 1989. – Т. 6. – С. 98-106.
2. Чанышев А.И., Абдулин И.М. Определение смещений контура горных выработок после их образования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10. – С. 20–30. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_0\_20.
3. Феклистов Ю. Г. Деформационный способ комплексного определения напряженного состояния и упругих характеристик горных и строительных объектов // Проблемы недропользования. – 2017. – №4 (15). – С. 28-32. DOI: 10.18454/2313- 1586.2017. 04.028.

## О КОСОМ ВНЕДРЕНИИ ЖЕСТКОГО КЛИНА В ПЛАСТИЧЕСКУЮ СРЕДУ С УРАВНЕНИЯМИ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРАНДТЛЯ - РЕЙСА

Чанышев А. И.<sup>1</sup>, Ефименко Л. Л.<sup>2</sup>, Белоусова О. Е.<sup>1</sup>, Лукьяшко О. А.<sup>1</sup>, Фролова И. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 54, Красный проспект,  
Новосибирск, 630091, Россия, a.i.chanyshev@gmail.com*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет экономики и управления, 52, ул. Каменская,  
Новосибирск, 630099, Россия, a.i.chanyshev@gmail.com*

Решается задача о нахождении предельной нагрузки при косом внедрении жесткого клина в пластическую среду. В случае гладких поверхностей граней клина устанавливаются значения сопротивлений массива пород продвижению клина по нормальям к его боковым поверхностям по ту и другую его стороны при заданной глубине внедрения клина, растворе угла при вершине. Для этого применяются классические уравнения пластичности Прандтля-Рейса в случае критерия пластичности Треска. Нагрузка, прикладываемая к клину, должна иметь проекции на нормали к его боковым поверхностям по величине равные значениям полученных сопротивлений. В случае, если какая-то из проекций окажется меньше значения вычисленного сопротивления, то тогда движение клина в эту сторону становится невозможным и клин в этом случае движется вдоль другой его грани.

Для решения задачи устанавливаются равновесия сил сопротивлений и приложенной силы. Для определения плеча или точки приложения внешней силы используется равенство нулю главного момента системы сил. Система уравнений равновесия сил рассматривается с двух позиций. Первый случай - когда известны сопротивления среды прониканию. В этом случае определяется необходимая нагрузка для проникания клина. Второй случай - когда известны компоненты приложенной силы. Из системы уравнений находятся сопротивления, которые необходимо преодолеть для движения клина.

Смещения в данной задаче предполагаются направленными вдоль характеристик, выходящих на свободную поверхность. Их величины на свободной поверхности являются заданными функциями, что следует из гиперболичности системы уравнений для определения смещений, включающей в себя закон упругого изменения объема и соосность тензоров напряжений и деформаций в пластической области деформирования [1,2].

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 124020700085-5)

### *Литература*

1. Качанов Л. М. Теория пластичности // Москва, Физматгиз. – 1960.
2. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – М.: ГИИТЛ. – 1956. – 529 с.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНИХ КРИТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ЗАДАЧЕ О ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВЫРАБОТКИ ЗА ПРЕДЕЛОМ УПРУГОСТИ

Чанышев А. И., Абдулин И. М., Белоусова О. Е., Лукьяшко О. А.

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 54, Красный проспект, Новосибирск, 630091, Россия, a.i.chanyshev@gmail.com

Рассматривается задача о сжатии плоскости с круговым отверстием. Требуется найти критическое значение нагрузки, при котором круговой контур отверстия исказится, перестанет быть круговым. Задача решается в упругопластической постановке в рамках теории пластического течения Прандтля – Рейса. Выписываются граничные условия в состоянии потери устойчивости. В начале решается упругопластическая задача с определением значений напряжений в пластической области. Затем эти напряжения в рамках гипотезы о продолжающемся догружении в момент искажения формы подвергаются проверке на предмет потери устойчивости. В результате подстановки этих напряжений в граничные условия Лейбензона – Ишлинского находятся те значения напряжений, при которых происходит потеря устойчивости первоначально кругового контура. Для получения нижних критических нагрузок в выражениях последних необходимо заменить упругий модуль сдвига на касательный. Этот момент приводит к нижним критическим нагрузкам по Ф. Шенли [1] и связан с эффектами сложного нагружения, когда в окрестности угловой точки в достигнутом напряженном состоянии существует область догружения, в которой соотношения между приращениями напряжений и деформаций имеют вид соотношений закона Гука, в которых модуль сдвига  $2\mu$  заменяется на касательный  $2\mu_p$ . Приводятся известные из литературы экспериментальные данные, подтверждающие существование такой области догружения. Анализируются результаты расчетов критической нагрузки с учетом упругопластических деформаций вокруг горной выработки при всестороннем сжатии.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 124020700085-5)

## Литература

1. Качанов Л. М. Теория пластичности // Москва, Физматгиз. – 1960.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Иванов Д. С.<sup>1</sup>, Аммосов Г. С.<sup>1</sup>, Корнилова З. Г.<sup>1</sup>, Антонов А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Подземные трубопроводы в Якутии проложены в вечномёрзлых грунтах и актуальной задачей является изучение нагрузок от воздействия морозных пучений.

В условиях распространения многолетнемерзлых грунтов подземный трубопровод дважды в год меняет свое положение в моменты замерзания и оттаивания, и это вызывает деформацию трубопровода [1]. Морозное пучение способно приводить к сильным изгибам трубопроводов, провисанию отдельных участков, перемещениям.

В статье представлены результаты измерений планово-высотных положений трубопровода на участке входа в протоку «Хатасская» с интервалом полгода. Многолетний мониторинг подземного газопровода показал, что имеются участки, где подземный трубопровод, проложенный в вечномёрзлом грунте, дважды в год деформируется разным образом, и изменения высотного положения за полгода достигают до двух метров [2]. Интенсивные полугодовые деформации подземного трубопровода требуют изучения вызывающих механизмов и оценки возникающих напряжений в самом трубопроводе. Как видно на рис. 1, сдвиги трубопровода за полгода достигают больших значений, например на участке 180-200 метров до 2 м, и угрожают нормальной эксплуатации.

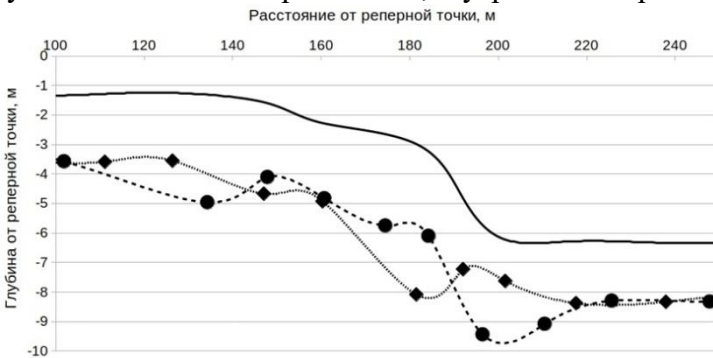


Рис. 1. Изменение положения трубопровода за полгода: — — дневная поверхность грунта, —◆— — измеренные положения подземного трубопровода в апреле 2018 г. (труба находится в мерзлом грунте), —●— — в ноябре 2018 г. (труба находится в оттаявшем грунте), - - - - - интерполированное положение трубопровода.

При деформации трубопровода, из данных планово-высотных измерений выясняют стрелу прогиба, из чего вычисляют радиус изгиба и оценивают возникшее напряжение [3-6]. Но в измеренном участке прогибы идут без интервалов — выпуклость сменяется вогнутостью, которая переходит в выпуклость и т. д.

Разработана методика оценки напряжений в трубопроводе, подвергающемся сложной деформации в виде нескольких подряд идущих арок, на основе данных, полученных из планово-высотных измерений.

## Литература

1. Лебедев М.П., Пермяков П.П., Иванов Дж.С., Яковлев Ю.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при пучении грунта. // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Arctic and Subarctic Natural Resources.* – Якутск, 2018, Т. 5, № 3. С. 114-120.
2. Иванов Дж.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г. Вывод уравнения подземного трубопровода для применения в расчетах напряженно-деформированного состояния при воздействии неравномерных морозных пучений // *Трубопроводной транспорт: теория и практика.* 2022. № 1 (81). С. 27-30.
3. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. – М.: Недра, 1982. – 340 с.
4. Горковенко А.И. Влияние некоторых закономерностей морозного пучения грунтов на высотное положение подземного трубопровода и его напряженно-деформированное состояние // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело».* 2006. № 1. URL: <http://ogbus.ru/article/view/vliyanie-nekotoryx-zakonomernostej-moroznogo-pucheniya-gruntov-na-vysotnoe-polozhenie-podzemnogo-truboprovoda-i-ego-napryazhenno-deformirovannoe-sostoyanie> (дата обращения: 22.03.2021)
5. Икрин В. А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности. - М: Изд. АСВ, 2004. - 424 с.
6. Ясин Э. М., Черников В. И. Устойчивость подземных трубопроводов. – М.: Недра, 1967. – 119 с.

# МЕТОДЫ И ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ В СРЕДНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ ЛЕНА

Антонов А. А.<sup>1</sup>, Корнилова З. Г.<sup>1</sup>, Яковлев Ю. А.<sup>1</sup>, Терешкин А. Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

В работе рассматриваются особенности проведения приборного исследования подводных переходов трубопроводов (ППТ) в среднем течении реки Лена. Представлены методы обследования, включая профильное зондирование с использованием георадара и гидролокатора, определение планово-высотного положения с помощью тахеометра и трассоискателя, а также использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для визуального контроля трассы трубопровода и прилегающей территории.

Для исследования подводных переходов трубопроводов в среднем течении реки Лена применяются следующие приборные методы [1, 2]:

1. Профильное зондирование с использованием георадара серии «ОКО-2» с антенным блоком АБ-150 или антенным блоком АБДЛ «Тритон».
2. Использование гидролокатора бокового обзора ГБО «Гидра-500Э» для обследования дна реки в районе ППТ.
3. Определение планово-высотного положения трубопровода с помощью трассоискателя «RD-8000» и электронного тахеометра.
4. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для визуального контроля трассы трубопровода и прилегающей зоны.

Эти методы обеспечивают проведение комплексного обследования подводных переходов трубопроводов в различных условиях, включая зимний период и условия Центральной Якутии.

Статья также содержит характеристику природно-климатических условий среднего течения реки Лена, таких как сильные течения, ледостав, неравномерное дно и переменчивость уровня воды, которые оказывают влияние на прокладку и обслуживание ППТ [3]. Гидрологические и гидроморфологические особенности реки Лена оказывают значительное влияние на прокладку подводных переходов трубопроводов. Некоторые из особенностей, которые необходимо учитывать при прокладке подводных переходов трубопроводов через реку Лену [4].

Для обеспечения надежного мониторинга состояния ППТ круглогодично в условиях Центральной Якутии используется специализированное оборудование, описанное в статье.

Таким образом, представлен комплексный подход к исследованию и мониторингу состояния подводных переходов трубопроводов в условиях реки Лена, включая методы, оборудование и учет особенностей природно-климатических условий данного региона.

## Литература

1. A.A. Antonov, Yu.A. Yakovlev, Z.G. Kornilova, A.L. Tereshkin. Monitoring of spatial position of the underwater crossing of MGL across the Lena river by instrumental methods / *Procedia Structural Integrity* / Volume 30, 2020, Pages 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.003>
2. A.A. Antonov, Yu.A. Yakovlev, G.S. Ammosov, Z.G. Kornilova. Investigation of the welded joints of siphon pipes of the underwater crossing of espo-1 main oil pipeline across the river Lena. IX Евразийский Симпозиум по проблемам прочности и ресурса в условиях низких климатических температур «EURASTRENCOLD-2020». Якутск, 14-17 сентября 2020 г.
3. Антонов В.С. Устьевая область реки Лены (гидрологический очерк). - Л.: Гидрологическое изд-во. 1967. 107 с.
4. Сапсай А.Н., Шарафутдинов З.З., Шаталов Д.А., Вафин Д.Р. Выбор метода строительства подводных переходов магистральных трубопроводов // *Нефтяное хозяйство* -2017. - № 11. – С.143-148

# ХОЛОДНОЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ МЕДНО-МАТРИЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Шикалов В. С.<sup>1</sup>, Видюк Т. М.<sup>1</sup>, Лушов А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 4/1, Институтская, Новосибирск, 630090, Россия, v.shikalov@gmail.com

Использование самосмазывающихся медно-матричных материалов и покрытий является эффективным способом обеспечения качественного токосяема и высокой износостойкости в контактных парах трения в машиностроении, электротехнике, транспорте и т.д. Холодное газодинамическое напыление (ХГН) является перспективным методом получения композиционных покрытий на основе меди с сохранением фазового состава, равномерным распределением компонентов, низкими остаточными напряжениями и высокой производительностью [1, 2]. В настоящей работе проводилось исследование структуры, механических и трибологических свойств медно-матричных ХГН-покрытий с различным содержанием частиц графита.

Покрытия были получены на медных подложках путем напыления порошковых смесей меди (ПМС-1, 59 мкм) и графита, плакированного сплавом Ni-P (НПГ-75, 89 мкм). Содержание плакированных частиц в полученных покрытиях составляло 5,3, 8,1 и 11,8 об.%. Частицы графита после напыления сохранили свою пластинчатую морфологию, что привело к формированию ламельной структуры покрытий (рис. 1). Фазовый состав покрытий не изменился по сравнению с составом исходных порошков. С ростом содержания плакированных частиц в покрытии среднее значение твердости монотонно увеличивалось с 99,7 до 110,1 HV<sub>1</sub>, что объясняется деформационным наклепом, а также ростом содержания в покрытии сплава Ni-P. Увеличение концентрации графита приводило к формированию сплошного смазывающего слоя, снижающего скорость износа с  $3,3 \times 10^{-5}$  до  $2,4 \times 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/Н×м и коэффициент трения с 0,53 до 0,33 в условиях сухого трения-скольжения. Механизм износа при этом сменялся с окислительного износа на отслоение, а затем на мягкий абразивный износ. Удельная электропроводность покрытий снижалась с 54,2 до 31,1 % IACS с увеличением концентрации плакированных частиц в покрытии.

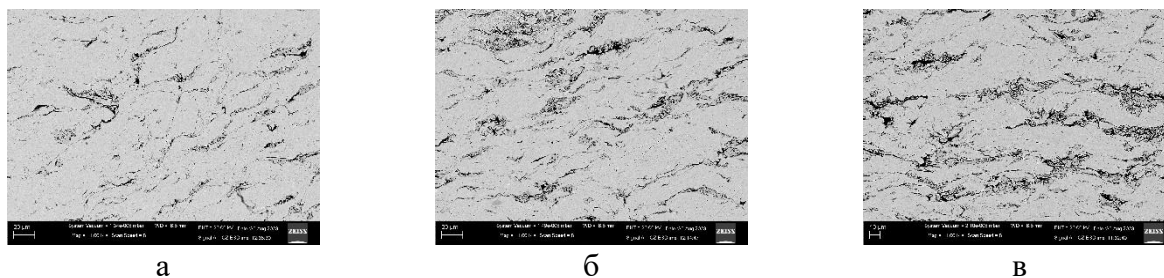


Рис. 1. Изображения медно-матричных покрытий с содержанием графита 5,3 (а), 8,1 (б) и 11,8 (в) об.%

Полученные экспериментальные результаты открывают перспективы использования ХГН в качестве технологии производства медно-матричных антифрикционных покрытий, работающих в условиях сухого трения-скольжения и востребованных в различных отраслях современной промышленности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10123, <https://rscf.ru/project/23-29-10123/> и Правительства Новосибирской области с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

## Литература

1. W. Chen, Y. Yu, J. Ma, S. Zhu, W. Liu, J. Yang. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019, 28, 1688 – 1698.
2. C. Huang, W. Li, Y. Xie, M.-P. Planche, H. Liao, G. Montavon. *Journal of Materials Science & Technology*. 2017, 33, 338 – 346.



# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Банников М. В., Баяндин Ю. В., Уваров С. В., Никитюк А. С., Наймарк О. Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, 1, ул. Академика Королева, Пермь, Россия, 614013, [mbannikov@icmm.ru](mailto:mbannikov@icmm.ru)*

В работе исследуется стадийность развития разрушения в присутствии двух типов автомодельных решений на основе данных акустической эмиссии и данных цифровой корреляции изображений при деформировании композитных образцов из углеродной ткани CW200-TW2/2 саржевого плетения с эпоксидной матрицей с круговым концентратором. Регистрация полей напряжений и анализ фазовых портретов для рассматриваемых режимов распространения трещин позволила установить существование двух аттракторов, соответствующих двум типам автомодельных решений, в виде множества точек «гиперболического типа» и случайного множества точек, соответствующих флуктуациям напряжений в областях локализации поврежденности и зарождения дочерних трещин.

Полученные результаты по кинетике развития поврежденности в присутствии двух типов автомодельных решений находятся в соответствие с представлениями, отраженными в двухпараметрических критериях разрушения [1]. Значения когезионной прочности и когезионной длины связаны с закономерностями кинетики локализации поврежденности, и определяются параметрами, отражающими нелинейность уменьшения свободной энергии (free energy release) при зарождении и росте дефектов в условиях их взаимодействия на различных структурных масштабах [2]. Обоснование связи структурных параметров и критериев механики разрушения композитных материалов предполагает использование данных томографии развития дефектов различных масштабных уровней

В работе применены алгоритмы кластерного анализа пространственно-временной динамики многомасштабного развития поврежденности композитов в условиях одноосного квазистатического и циклического нагружений по данным акустической эмиссии и распределений флуктуаций полей деформаций.

Выявлено, что при растяжении композиционного материала с увеличением степени деформации размер макродефектов укрупняется, а фактор их дисперсности снижается. Это позволяет утверждать о наличии общей тенденции к размерной эволюции дефектов в макроструктуре композита, темп развития которой зависит от равномерности распределения напряжений в материале в процессе деформации. Установлено, что разница в степени деформации отражается на распределении дефектов на диаграмме в координатах «расстояние между элементами пористости-морфометрические параметры пористости». Деформация в области концентрации напряжений приводит преимущественно к сокращению расстояния между элементами пористости, тогда как деформация вне концентратора напряжений обеспечивает преимущественно морфометрические изменения дефектов. Обнаружено образование микротрещин в матрице материала в отдельных слоях вблизи концентраторов напряжений при циклическом деформировании, которые при дальнейшем нагружении сливаются в макротрещины, пронизывающие весь материал.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30041), <https://rscf.ru/en/project/21-79-30041/>

## *Литература*

1. Naimark O., Bayandin Y., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. 2021. // *Acta Mech.* 232, 1943-1959.
2. Naimark O.B. // *Int.J.Fracture* 202, 2016. 271-279.

# ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ НА СВЕРХМНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Волосков Б. С., Сергеичев И. В.

Сколковский институт науки и технологий, Центр Технологий материалов, 30, с1,  
Большой бульвар, Москва, 121205

Аддитивное производство, также известное как 3D-печать, представляет собой технологию, которая позволяет создавать детали сложной формы путем добавления материала по слоям. Этот процесс обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики, которые часто не уступают характеристикам деталей, изготовленных традиционными методами производства [1]. Недавние исследования показали значительное улучшение качества деталей, изготовленных с использованием аддитивного производства [2]. В связи с растущим использованием металлов и сплавов, полученных методами аддитивного производства в конструкционных приложениях крайне важно исследовать влияние технологических дефектов при циклическом нагружении. В отличие от традиционных методов производства, аддитивное производство дает возможность создавать искусственные внутренние дефекты заданной формы, размера и расположения [3].

Данное исследование посвящено изучению влияния искусственно созданных дефектов на сверхмногоцикловую усталость (very high cycle fatigue, VHCF) коррозионноустойчивой стали 316L. Образцы были напечатаны вертикально с использованием технологии лазерного наплавления порошкового слоя, с геометрией, очень близкой к окончательной форме образца VHCF (с превышением на 1 мм по всем размерам для последующей механической обработки). Каждый образец содержал один встроенный искусственный дефект диаметром от 90 мкм до 350 мкм, расположенный на определенном расстоянии от поверхности (от 350 мкм до 1500 мкм). Параметры печати были предварительно оптимизированы для получения искусственных дефектов желаемых размеров.

Поверхности разрушения образцов после испытаний VHCF были проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии (Рис. 1). Результаты показали, что поверхности

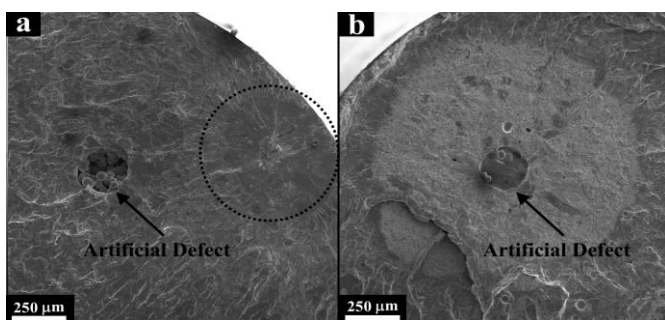


Рис. 1. Поверхность разрушения образца после сверхмногоцикловой усталости

разрушения преимущественно имеют вид "рыбьего глаза", с мелкозернистой областью вокруг внутренних дефектов, что характерно для VHCF. Однако, несмотря на наличие относительно крупных искусственных дефектов, трещины часто возникали из гораздо меньших естественных дефектов, расположенных ближе к поверхности, чем искусственные. Примечательно, что ни одна трещина не возникла из искусственных дефектов, расположенных в центре образца,

что, вероятно, связано со сжимающими остаточными напряжениями, обычно возникающими в центре образцов в процессе изготовления. В ходе исследования также была определена зависимость между вероятностью возникновения трещин из искусственных дефектов и расстоянием искусственного дефекта от поверхности образца. Снятие остаточных напряжений привело к образованию трещин от искусственного дефекта, расположенного в центре образца.

## Литература

1. T. DebRoy, ..., Zhang, *Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties*, *Prog. Mater. Sci.* (2018) 112–224.
2. A. Yadollahi, N. Shamsaei, *Additive manufacturing of fatigue resistant materials: Challenges and opportunities*, *Int. J. Fatigue*. 98 (2017) 14–31.
3. B. Voloskov, T. Mishurova, S. Evlashin, I. Akhatov, G. Bruno, I. Sergeichev, *Artificial Defects in 316L Stainless Steel Produced by Laser Powder Bed Fusion : Printability , Microstructure , and Effects on the Very-High-Cycle Fatigue Behavior*, *Adv. Eng. Mater.* 2200831 (2022) 1–13.

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ AISI 304

Смолин И. Ю.<sup>1</sup>, Кузнецов В. П.<sup>2</sup>, Косарева А. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, д. 2/4, пр. Академический, Томск, 634055, Россия, smolin@ispms.ru*

<sup>2</sup> *Уральский федеральный университет, д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия, wrkuzn@mail.ru*

Одним из распространенных методов финишной отделочно-упрочняющей обработки металлических деталей и изделий поверхностной пластической деформацией является выглаживание. Оно производится на современных универсальных станках с ЧПУ. При этом подвижный инструмент вдавливается в поверхность вращающейся детали (изделия). Обычно, форма индентора является полусферической, а в качестве материала для индентора используют синтетический или природный алмаз. Когда в поверхностных слоях обрабатываемого материала образуется нанокристаллическая структура, то говорят о наноструктурирующем выглаживании [1]. Для обоснования выбора соответствующих технологических параметров полезным средством оказывается применение численного моделирования [2, 3].

Целью настоящей работы является численное исследование влияния силы и скорости выглаживания, а также количество проходов индентора на контактное давление и накопленную пластическую деформацию в контактной зоне, способные обеспечить формирование нанокристаллической структуры в поверхностных слоях стали AISI 304.

Моделирование выполнено в программном комплексе ABAQUS. Задача решена в двухмерном приближении в динамической связанной термомеханической постановке, что позволило достаточно подробно исследовать напряженно-деформированное состояние в области контакта и влияние на него повышенных температур, вызванных трением и пластическим деформированием. Разработанная конечно-элементная модель является развитием модели, предложенной авторами ранее [3]. Индентор моделировался жестким телом, а сталь – упругопластической средой по модели Джонсона–Кука.

Моделирование позволило установить оптимальные величины силы выглаживания, скорости выглаживания и количества проходов индентора для обеспечения контактного давления и накопленной пластической деформации, способствующих образованию нанокристаллического состояния в стали AISI 304. При этом температура в контактной зоне не приводит к нежелательным структурным преобразованиям, а растягивающие напряжения позади индентора не вызывают растрескивания поверхностного слоя.

Результаты моделирования находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными о давлении и накопленной деформации в стали AISI 304 при выглаживании.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003 и в молодежной лаборатории модификации поверхностей материалов ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования № 075-03-2024-009/4 от 11.04.2024 (номер темы FEUZ-2024-0020).

## Литература

1. А.И. Дмитриев, В.П. Кузнецов, А.Ю. Никонов, И.Ю. Смолин, С.Г. Псахье. *Физическая мезомеханика*. 2014, Т. 17, № 3, 6–13.
2. E. Becerra-Becerra, C.O. Aguilera Ojeda, A. Saldaña-Robles, J.F. Reveles-Arredondo, J. Barco-Burgo., A. Vidal-Lesso. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2023, V. 218, Art. No. 103926, 1–19.
3. V. Kuznetsov, I. Smolin, A. Skorobogatov, A. Akhmetov. *Applied Sciences*. 2023, V. 13, Iss. 9, Art. No. 5324, 1–21.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

Ладейщиков К. М., Карагерги Р. П., Козлов А. В.

*АО «Институт реакторных материалов», а/я 29, г. Заречный, Свердловской обл., 624250,  
Россия*

*ladeishchikov\_km@irmatom.ru*

Одним из важных элементов безопасности ядерных реакторов являются оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭлов). Для реакторов на быстрых нейтронах (БН-600 и БН-800) используют оболочки из аустенитной стали типа X16N19. Под действием нейтронного облучения и высоких температур происходят структурные изменения материала, набухание и формоизменение оболочки, что ограничивает ресурс эксплуатации ТВЭлов. Для оценки остаточного ресурса проводят послереакторные исследования комплекса физико-механических свойств материала оболочек, в частности характеристик упругости.

Характеристики упругости (модуль Юнга -  $E$ , модуль сдвига -  $G$  и коэффициента Пуассона -  $\mu$ ) необходимы для различных инженерно-технологических расчетов и широко используются при анализе напряженно-деформированного состояния. Существуют разные методы определения характеристик упругости. Например, довольно точно их можно определить с помощью неразрушающего ультразвукового динамического резонансного метода. Суть метода заключается в возбуждении продольной и сдвиговой волн в исследуемом образце с помощью пьезоэлектрических систем. По полученным значениям резонансных пиков колебаний вычисляют модуль упругости и модуль сдвига, а коэффициент Пуассона рассчитывают из соотношения полученных характеристик.

Так как при нейтронном облучении сильно меняется структура материала, а высокая температура, совместно с облучением, приводит к изменению физико-механических свойств материала, то определение температурной зависимости характеристик упругости материала оболочек ТВЭлов является актуальной задачей.

Целью исследования является выявление температурных зависимостей характеристик упругости материала оболочек ТВЭлов, а также оценка влияния повреждающей дозы на относительное изменение модуля Юнга оболочки.

Материалом исследования послужила оболочка ТВЭла из стали типа X16N19 после облучения в реакторе БН-600, из которой вырезали трубчатые образцы длиной  $30,0 \pm 0,2$  мм. С помощью гидростатического метода определяли плотность образцов. Для определения резонансных пиков колебаний в исследуемом материале использовали «Высокотемпературную ультразвуковую установку». Во время измерения образцы нагревали от  $25^\circ$  до  $600^\circ\text{C}$ . Погрешность измерений не превышала 2,5%.

Выявлено, что температурная зависимость модулей упругости оболочки имеет линейный характер уменьшения. Однако наблюдается разброс начальных (при  $25^\circ\text{C}$ ) значений, вызванный структурными изменениями в материале из-за неоднородных условий облучения участков ТВЭла.

Установлено, что с ростом повреждающей дозы относительное изменение модуля Юнга уменьшается. Показано, что набухание оболочки ТВЭла вносит существенный вклад в снижение характеристик упругости, которое выражается в уменьшении относительного изменения модуля Юнга на 2% с увеличением набухания на 0,5% при одинаковой повреждающей дозе.

Показано, что ультразвуковой динамический резонансный метод позволяет с высокой точностью определять характеристики упругости образцов оболочки ТВЭла после высокодозного нейтронного облучения в широком диапазоне температур.

# ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПЕРЕХОДНОГО КЛАССА

Захаров И. Н.<sup>1</sup>, Романенко М. Д.<sup>2</sup>, Баринов В. В.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»  
400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28

<sup>1</sup> [4zahar@gmail.com](mailto:4zahar@gmail.com)

<sup>2</sup> [romanenko.mihail2009@yandex.ru](mailto:romanenko.mihail2009@yandex.ru)

<sup>3</sup> [4bvv@bk.ru](mailto:4bvv@bk.ru)

Влияние комбинированного упрочнения на сопротивляемость поверхностного слоя граничному износу исследовалось при трении скольжения на роликах диаметром 40 мм и шириной 10 мм из титанового сплава VT22 в состоянии поставки (двойного отжига) в паре с колодкой из закаленной стали 45. Испытания проводились на машине трения СМЦ-2. Давление на образец в зоне контакта составляло 1 МПа, линейная скорость около 1 м/с, в качестве охлаждающей жидкости использовалась техническая вода.

Испытания образцов на износ производились на базовом числе циклов, равном 40000. В случае испытаний исходных образцов массовый износ составил 0,026 г. Для образцов, обработанных по режиму ЭМО переменным током плотностью 300 А/мм<sup>2</sup>, массовый износ снизился на 39% по сравнению с неупрочненными образцами. Операция старения, проведенная после ЭМО (300 А/мм<sup>2</sup>), хотя и сопровождается увеличением микротвердости поверхности (29%) к росту износостойкости не приводит. После ЭМО постоянным током той же плотности (300 А/мм<sup>2</sup>) также наблюдается снижение износа (на 25%), при этом операция дополнительного старения приводит к аналогичному результату — повышению микротвердости при почти неизменной износостойкости.

ЭМО переменным током плотностью 600 А/мм<sup>2</sup> приводит к увеличению износостойкости практически в 2 раза по сравнению с плотностью тока 300 А/мм<sup>2</sup> — до 77%. Большой энергетический вклад в локальный объем поверхностного слоя металла при ЭМО постоянным током плотностью 600 А/мм<sup>2</sup> привело к еще более существенному повышению износостойкости титанового сплава VT22 — практически до 100 раз. Эффект старения после ЭМО и в этих случаях состоит в повышении микротвердости поверхности (на 30–40%) при несущественном изменении (и даже некотором снижении) износостойкости.

Для исследованных титановых сплавов термическая обработка при ЭМО также сопровождается формированием ультрадисперсной зёрненной структуры металла (с размером частиц около 80–400 нм). При этом повышение твёрдости (на 35–40 % относительно исходного уровня) в этом случае обеспечивается последующим деформационным и термическим воздействием (при БУФО, старении и др.).

Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта № 5/640-24

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ КОЛЛОИДНЫХ РУД В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

Москвитина Л. В.<sup>1</sup>, Москвитин С. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН*

Железорудные месторождения Якутии, учитывая геохимическую специализацию региона, имеющего повышенный фон редких и редкоземельных элементов, являются перспективным материалом для разработки специальных сталей. Исследованные осадочные руды Буотамского железо-марганцевого месторождения Центральной Якутии образованы в результате низкотемпературного коллоидного метасоматоза [1].

Геохимической особенностью руд, является наличие в составе руд примесей ниобия и редкоземельных элементов концентрирующихся в реликтовом углеродистом веществе, который заполняет многочисленные мелкие каверны и пустоты руды. Последние исследования показали, что руды коллоидной текстуры и структуры обладают свойствами ультрадисперсных металлоколлоидов [2,3]. Ультрадисперсные металлоколлоиды обладают высокой сорбционной, диффузионной активностью и способностью к коагуляции, при которой они захватывают из маточного раствора различные элементы [4].

Данная работа посвящена исследованию фазовых превращений коллоидных минералов в металлургическом процессе.

Для исследования кинетики плавления и свойств промежуточных фаз проведена экспериментальная плавка железо-марганцевой руды методом прямого восстановления. В плавильную печь закладывали послойно фракцию руды размером примерно 10x10 мм. с древесным углем. Температура плавки замерялась в зоне распара печи платина-платинородиевой термопарой. Структурные превращения минералов исследовали путем отбора проб при определенных температурах оптическим, РЭМ, рамановской спектроскопией.

В металлургическом процессе установлено, что с началом размягчения шлакообразующих при  $t = 930^{\circ}\text{C}$  начинается отдельная коагуляция окислов железа, окислов марганца и углеродистого вещества в обособленные шаровидные скопления.

В плавильной печи процесс коагуляции минералов продолжается до  $1200^{\circ}\text{C}$ . В интервале температур  $1200-1300^{\circ}\text{C}$  коагулированные шаровидные скопления распадаются на отдельные дисперсные блоки, образуя многочисленные микротрещины. При достижении бифуркационной точки ( $1300^{\circ}\text{C}$ ) внутри происходит раскристаллизация с образованием игольчатых структур. В результате отрыва кислорода восстановителем появляются карбиды сложного состава. Микроструктура сплава состоит из смеси цементита, иголок  $\alpha\text{-Fe}$ , закиси железа и карбидов сложного состава.

РЭМ до последних циклов плавления находятся в коагулировавшем углеродистом веществе и в заключительной стадии плавления участвуют в восстановительных процессах и карбидообразовании. При достижении  $1400^{\circ}\text{C}$  формируется окончательная структура передельного чугуна, в котором глобулярный тонкозернистый перлит находится в цементе, состоящем из игольчатых ферритов, цементита и мелкодисперсных карбидов. Полученный передельный чугун из природнолегированной коллоидной руды является полуфабрикатом для изготовления специальных сталей с высокими механическими свойствами.

### *Литература*

1. Л.В. Москвитина, С.Г. Москвитин, О.И. Слепцов Водородное восстановление коллоидных железо-марганцевых руд» М.: Ж. «Химическая технология» № 5. 2011. С. 265-268
2. А.Д. Зимон, А.Н. Павлов Коллоидная химия наночастиц. М: Научный мир, 2012, 224 с.
3. Г. Николис, И. Пригожин Самоорганизация в неравновесных системах.-М.: Мир, 1979, 512 с.
4. З. Я. Берестнева, В. А. Каргин. О механизме образования коллоидных частиц // Успехи в химии. 1955. Т. 24. Вып. 3. С. 249-259.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Смирнов С. В., Мясникова М. В.

*Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия  
email: marina\_31076@mail.ru*

В работе предложена новая методика оценки адгезионной прочности полимерного покрытия на основе численной реализации подхода механики разрушения при обработке результатов, полученных при испытаниях по внедрению индентора Роквелла. В качестве покрытия выбрали полимерную композицию горячего отверждения на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с титаналкоксидным отвердителем [1], нанесенную на основу из стали Ст 3. Толщина покрытия составила 160 мкм. Испытания на индентирование проводили на испытательной машине Zwick/Roell Z2,5 при комнатной температуре. При внедрении перпендикулярно поверхности покрытия наконечник индентора пластически деформирует некий объем материала покрытия, что приводит к формированию кольцевой области вспучивания покрытия вокруг отпечатка. С увеличением глубины внедрения на границе соединения материалов покрытия и основы может зародиться и начать развиваться трещина, вследствие разрушения адгезионных связей преимущественно за счет радиального сдвига при вытеснении материала покрытия из-под индентора. Факт возможного отслоения покрытия от основы, а также ширину отслоившейся области фиксировали по изменению эффективных упругих свойств адгезионного соединения в области вблизи отпечатка. Всего при одной и той же нагрузке на индентор было получено и обработано 20 отпечатков индентора Роквелла, что позволило усреднить полученные результаты и перейти от локальной оценки адгезионной прочности покрытия к интегральной.

Численное моделирование условий индентирования осуществляли в программном пакете ANSYS на вычислителе кластерного типа «URAN» Института математики и механики УрО РАН. Для задания адгезионного контакта использовали слой контактных элементов с особыми свойствами, определяющими деформационно-прочностные характеристики адгезионных связей и формирующимися посредством реализованной в ANSYS модели CZM [2-3]. Предполагается, что при взаимном смещении поверхностей в плоскости контакта возникает виртуальный упругий слой, обладающий контактной жесткостью. Тогда задача разрушения адгезионного контакта сводится к эквивалентной задаче когезионного разрушения виртуального слоя непосредственно перед фронтом трещины, движущейся при разрыве адгезионных связей. Диаграмма CZM реализует билинейный трехпараметрический закон, описывающий соотношение между касательным напряжением сцепления и вытяжкой адгезионных связей при сдвиге взаимодействующих поверхностей. Площадь диаграммы соответствует предельной величине удельной поверхностной энергии, затрачиваемой на распространение трещины адгезионного разрушения. Варьируя значения параметров диаграммы CZM, можно численно управлять величиной энергии адгезионного разрушения, а значит и шириной отслоившейся области покрытия при одной и той же глубине внедрения индентора. В качестве критерия для количественной оценки адгезионной прочности была использована предельная величина удельной поверхностной энергии адгезионного разрушения. По результатам моделирования определено оптимальное значение предельной удельной поверхностной энергии адгезионного разрушения покрытия при параметрах диаграммы CZM, обеспечивающих наилучшее схождение расчетных и экспериментальных данных.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-29-00528.*

### Литература

1. A.V. Pestov, V.A. Kuznetsov, A.V. Mekhaev, T.I. Gorbunova, V.I. Saloutin, S.V. Smirnov, D.I. Vichuzhanin, P.P. Matafonov. *Polymer Science, Series D*. 2015, 8(2), pp. 149–152.
2. Alfano, M.A. Crisfield. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2001, 50, pp. 1701–1736.
3. X. Xu, A. Needleman. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1994, 42(9), pp. 1397–1434.

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ СВАРКИ, БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ**

Крючева К. Д.<sup>1</sup>, Путилова Е. А.<sup>1</sup>, Крылова С. Е.<sup>2</sup>, Приймак Е. Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*ИМАШ УрО РАН, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия,  
kristina.kryucheva@mail.ru*

<sup>2</sup>*ОГУ, 13, пр. Победы, Оренбург, 460018, Россия*

<sup>3</sup>*АО «Завод бурового оборудования», 118, пр. Победы, Оренбург, 460026, Россия*

Развитие и освоение нефтегазовых месторождений приводит к необходимости создания, разработки и исследования как материалов, обладающих требуемым уровнем прочностных и эксплуатационных свойств, так и способов их соединения. Применение биметаллических конструкционных материалов зарекомендовало себя как способ получения материала с особым комплексом свойств. Таким примером является биметаллическая труба, основу которой составляет конструкционная сталь, обеспечивающая необходимый уровень прочностных свойств, а плакирование осуществляется коррозионностойкой сталью, с целью обеспечить повышенную стойкость в кислой среде.

Необходимость получения протяженных биметаллических объектов, в том числе применяемых в нефтегазодобывающей отрасли, ставит перед исследователями задачи развития и изучения особенностей способов формирования стыковых соединений подобных материалов. Сварные соединения биметаллических материалов представляют собой сложную в металлургическом отношении систему, формирующуюся при соединении металлов с разным легированием и иногда принадлежащих к различным структурным классам. Поэтому важно исследовать закономерности формирования и изменения структуры и свойств, а также возможные проблемы, характерные для сварных соединений разнородных материалов.

В данной работе проведены исследования, направленные на установление особенностей формирования структуры стыкового сварного соединения в процессе лазерной сварки и ротационной сварки трением биметаллической трубы, полученной по технологии лейнирования из бесшовных стальных труб марок 50Г2С и 08Х18Н10Т.

Показано, что стандартные режимы, практикуемые для традиционных (однослойных) труб не совсем применимы для биметаллических изделий. При лазерной сварке происходит образование трещин на границе шва. При ротационной сварке трением качество шва значительно лучше, однако из-за различных пластических свойств материалов происходит наплыв одного металла в зону другого.

Показано, что ширина зоны термического влияния в случае ротационной сварки трением значительно меньше, чем при лазерной сварке. Узкая ЗТВ указывает на более точное управление тепловым процессом и меньшую вероятность образования дефектов, таких как поры и трещины. Следовательно, использование метода ротационной сварки обеспечивает более контролируемый нагрев и плавление металла. Однако в случае биметаллической трубы требует доработки в плане установления режимов и способов подготовки кромки свариваемых объектов.

Полученные данные позволят разработать дальнейшие рекомендации по сварке разнородных биметаллических материалов, учитывая особенности их химической и структурной совместимости.



# ВЛИЯНИЕ ДВУХОСЕВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА НЕЛИНЕЙНЫЙ ОТКЛИК ПРИ ВНУТРИСЛОЙНОМ СДВИГЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гусейнов К. А.<sup>1</sup>, Лешков Е. В.<sup>1</sup>, Оливенко Н. А.<sup>1</sup>, Кудрявцев О. А.<sup>1</sup>, Сапожников С. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, д. 76, пр-т Ленина, г. Челябинск, 454080, Российская Федерация, kudriavtcevoa@susu.ru

В ряде случаев полимерный композитный материал (ПКМ) может демонстрировать существенно нелинейное механическое поведение, и использование предположения о его линейно-упругой работе при расчетах реальных конструкций может приводить к консервативной оценке прочности. В связи с этим интерес представляют модели нелинейного деформирования ПКМ. Параметры этих моделей часто определяют по результатам испытаний на растяжение образцов, вырезанных под углом к направлению армирования (off-axis tests).

Следует отметить, что данные испытания являются достаточно дискуссионными, поскольку нелинейный отклик композита в этом случае определяется не только влиянием вида напряженного состояния, но также и явлением разворота волокон [1, 2]. Также при внеосевых испытаниях торцы образца стеснены захватами, что приводит к его S-образному искривлению [3]. В связи с этим, полученные диаграммы деформирования отражают, скорее, свойства образцов (конструкций), чем исследуемых материалов.

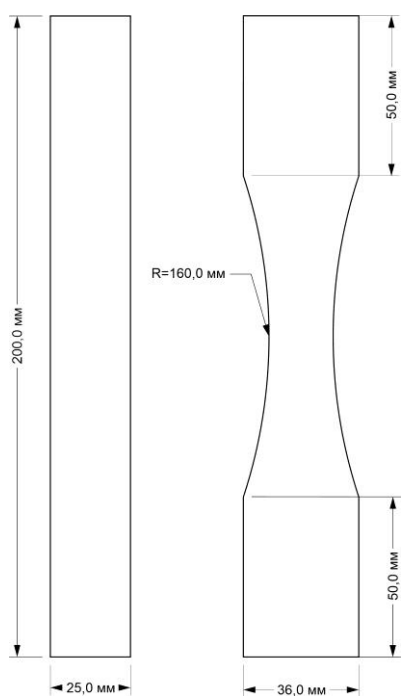


Рис. 1. Образцы для испытаний на растяжение под углом к направлению армирования

Данная работа преследовала две основных цели: необходимо было оценить влияние вида напряженного состояния, а также эффекта разворота волокон на вид диаграммы внутрислойного сдвига. Для этого были проведены испытания образцов-полосок равнопрочного тканевого углепластика с укладкой  $[0^\circ]_{20}$ , вырезанных под углами  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$  к направлению основы, на растяжение (рис. 1, слева), а также образцов с надрезами на сдвиг по методу Иосипеску. Вторая цель: оценить влияние формы образца на результаты внеосевых испытаний на растяжение. При анализе внеосевого нагружения композитов исследователи в разное время использовали как образцы-полоски, так и галтельные образцы различной формы и размеров [4]. Наличие ослабленного сечения позволяет достичь разрушения в рабочей части образца. Для получения

представления о влиянии формы образца на получаемые результаты в данной работе также были проведены испытания на растяжение галтельных образцов (рис. 1, справа).

По результатам испытаний установлено, что в диапазоне деформаций до 5% приемлемой точности при описании нелинейных кривых сдвига внеосевых испытаний можно добиться на основе единой кривой чистого сдвига.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект номер 23-19-20039).*

## Литература

1. Yang, J., Yang, X., Zhu, H., Shi, D., Chen, X., & Qi, H. The effect of off-axis angles on the mesoscale deformation response and failure behavior of an orthotropic textile carbon-epoxy composite. *Composite Structures*, 2018, 206, 952-959.
2. Koohbor, B., Ravindran, S., & Kidane, A. Meso-scale study of non-linear tensile response and fiber trellising mechanisms in woven composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, 35(12), 986-995.
3. Поллюлов А.Н. Этюды по механике композитов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. — 316 с.
4. Holmes, J., Sommacal, S., Das, R., Stachurski, Z., & Compston, P. Characterisation of off-axis tensile behaviour and mesoscale deformation of woven carbon-fibre/PEEK using digital image correlation and X-ray computed tomography. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 229, 109448.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЕ ВОЗДУХА В ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА

Цинкер М. Ю.<sup>1,2</sup>, Трусов П. В.<sup>1,2</sup>, Нурисламов В. В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
д. 29, ул. Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления  
рисками здоровью населения», д. 82, ул. Монастырская, г. Пермь, 614045, Российская  
Федерация, cinker@fcrisk.ru

Работа посвящена развитию разрабатываемой авторами математической модели дыхательной системы (ДС) человека, предназначенной для прогнозирования возникновения патологий органов дыхания, обусловленных негативным воздействием загрязненности атмосферного воздуха [1]. В разрабатываемой математической модели дыхательная система описывается с использованием совокупности двух подмоделей: течения воздуха в воздухоносных путях [2] и движения воздуха в деформируемых легких человека [3]. Предлагаемая работа посвящена вопросам, связанным с исследованием течения воздуха в легких человека. Легкие человека, образованные мелкими дыхательными путями и альвеолами, с содержащимся в них воздухом моделируются сплошной упруго-деформируемой двухфазной насыщенной пористой средой, заключенной во внутреннюю камеру с изменяющимся объемом (подвижными стенками). Первая фаза представляет собой деформируемый каркас (легочная ткань), вторая – газ, заполняющий поровое пространство. Решается совместная задача упругого деформирования пористой среды легких и фильтрации воздуха через деформируемую пористую среду. Концептуальная и математическая постановки задачи представлены в [3]. Воздух поступает в легкие через границы выходов и системы бронхов (из подмодели воздухоносных путей [2]), на стенках легких используются кинематические граничные условия. Геометрия области моделирования восстановлена на основе томографических снимков (рисунок 1).

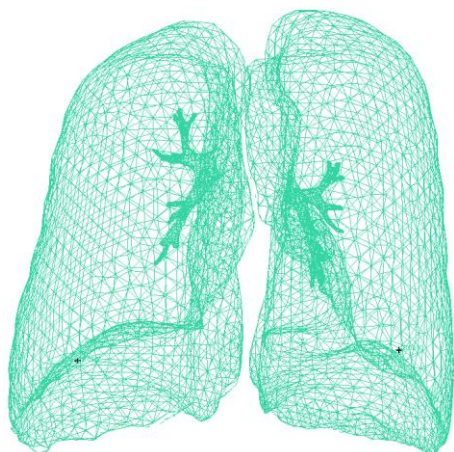


Рис. 1. Конечно-элементная сетка легких, используемая для дискретизации исследуемой области, заполненной двухфазной пористой средой

Легкие человека в процессе дыхания испытывают большие градиенты перемещений, вследствие чего рассматриваемая задача относится к классу геометрически нелинейных задач. Получить аналитическое решение поставленной нелинейной связанной задачи на настоящий момент представляется невозможным. В связи с этим для решения предлагается использование численных методов с использованием пошаговой процедуры.

Для численного решения нелинейной задачи деформирования двухфазной среды легких используется метод конечных элементов, для задачи фильтрации (относительного течения воздуха в деформируемой пористой среде легких) – метод конечных (контрольных) объемов. Для решения данной нелинейной задачи разработаны алгоритмы и комплекс программ.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0003).

## Литература

1. P.V.Trusov, N.V. Zaitseva, M.Yu. Tsinker. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2023. V. 18. № 5, pp. 38-53.
2. П.В.Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер, А.И. Кучуков. *Математическая биология и биоинформатика*. 2023. Т. 18. № 2. С. 347-366.
3. П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2020. № 4. С. 165–174.

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ ЗАТЯЖКИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНО-РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Попков А. А., Бехер С. А., Мурованный Ю. Н., Снежков И. И.

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», 191,  
ул. Дуси Ковальчук, г. Новосибирск, 630049, Россия, zabagy@gmail.com*

Оценка внутреннего напряженно-деформированного состояния сопряженных тел напрямую связана с прочностью и надежностью конструкций. Задача определения параметров состояния является актуальной для таких отраслей как энергетика, транспорт, машиностроение. В конструкциях машин, механизмов и строительных сооружениях широко применяются прессовые и резьбовые соединения, неподвижность которых обеспечивается силами трения. Необходимый уровень этих сил создается упругими механическими напряжениями, формируемыми на этапе монтажа. В процессе эксплуатации при воздействии ударных и вибрационных нагрузок, износов, развития трещин под напряжением, коррозии и повышенного нагрева упругие механические напряжения снижаются. Это приводит к пропорциональному уменьшению сил трения. Когда эти силы становятся ниже рабочих нагрузок, нарушается неподвижность соединения, что является причиной отказов технических средств в эксплуатации. Для их предотвращения необходим периодический контроль сил трения как в прессовых, так и в резьбовых соединениях. Контроль соединений может быть выполнен в процессе прессования или при демонтаже по максимальной силе запрессовки [1]. Однако многократные операции демонтажа и повторного монтажа соединений с натягом при плановых видах ремонта оборудования повреждает поверхности деталей и негативно сказывается на их сроке службы [2]. Таким образом разработка методических и технических средств определения плотности посадки прессовых соединений и силы затяжки болтовых соединений без снятия является актуальной.

Целью работы является оценка возможности определения плотности посадки прессовых соединений и силы затяжки болтовых соединений по результатам частотного анализа свободных и вынужденных колебаний. В ходе экспериментальных исследований контролируемый объект подвергался воздействию ультразвуковых колебаний заданной частоты и конфигурации, источником которых являлся пьезоэлектрический преобразователь, устанавливаемый на поверхность объекта. По характеристикам отраженных колебаний на резонансных частотах определялась величина трения, возникающих между поверхностями сопряжения.

Также анализировались другие методы воздействия на контролируемый объект, в том числе локальное тепловое и динамическое нагружение. В результате исследования закономерностей распространения теплового потока в кольцах подшипников и образцах натяга показана возможность разделения деформаций, связанных с влиянием температуры на область измерения деформаций и градиента температуры в области нагрева. Экспериментально реализованы способы контроля прессовых и болтовых соединений при воздействии нагревателя с измерением деформаций оптико-поляризационным датчиком. Установлена корреляционная связь времени достижения максимума локальных деформаций с натягами прессовых соединений и знака деформаций кольца подшипника с неплотностью прессовой посадки, зазором между кольцом и валом. Установлено, что связь регистрируемых деформаций с натягом наблюдается только при условии, что напряжения превышают начальные нормальные напряжения на границе соединения и напряжения трения, вызванные прессовой посадкой.

## *Литература*

1. Бехер С.А., Степанова Л.Н., Рыжова А.О., Бобров А.Л. Контроль натяга колец подшипников поверхностными волнами с использованием эффекта акустоупругости // Дефектоскопия. 2021. № 4. С. 13-21)
2. Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н. Методы повышения эффективности контроля затяжки резьбовых соединений // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 7. С. 40-42.

# СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ ТКАНЕВОГО КОМПОЗИТА ПРИ ОДНОКРАТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Игнатова А. В.<sup>1</sup>, Гусейнов К. А.<sup>1</sup>, Лешков Е. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, д. 76, пр-т Ленина, г. Челябинск, 454080, Российская Федерация, [ignatovaav@susu.ru](mailto:ignatovaav@susu.ru)

При проектировании надежных конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ) необходимо учитывать особенности деформирования последних. ПКМ в ряде случаев может демонстрировать выраженное нелинейное поведение при однократном/многократном нагружении. В работах [1-4] было отмечено, что источниками нелинейного поведения при растяжении образцов из ПКМ, вырезанных под разными углами к направлению армирования, является неупругое деформирование матрицы, накопление повреждений в слое, разворот волокон. Актуальной задачей является разработка моделей, которые учитывают все или часть указанных эффектов и позволяют адекватно прогнозировать деформирование композита в рабочем диапазоне деформаций с учетом параметров, однозначно определяемых на основе стандартных испытаний на растяжение и сдвиг.

В данной работе представлена структурная модель деформирования тканевого композита при однократном растяжении. В модели, основанной на классической теории слоистых пластин, было учтено изотропное упругопластическое поведение матрицы и упругое поведение армирующего наполнителя. Модель, описывающая упругопластическое деформирование матрицы в композите при разных видах нагружения, была записана в виде

$$d\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}^{ep} d\sigma_{kl} = (S_{ijkl}^e + S_{ijkl}^p) d\sigma_{kl},$$

где  $S_{ijkl}^{ep}$  – упругопластическая матрица податливости, основанная на касательном модуле,  $S_{ijkl}^e$  – матрица податливости материала,  $S_{ijkl}^p$  – матрица пластичности,  $d\sigma_{kl}$  – приращения напряжений. При малых перемещениях приращения общих деформаций могут быть разделены на приращения упругих и пластических деформаций:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p = S_{ijkl}^e d\sigma_{kl} + d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = S_{ijkl}^e d\sigma_{kl} + \frac{3d\varepsilon_e^p}{2\sigma_e} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}.$$

Здесь  $d\varepsilon_{ij}$  – приращение общих деформаций,  $d\varepsilon_{ij}^e$  – приращение упругих деформаций,  $d\varepsilon_{ij}^p$  – приращение пластических деформаций,  $\lambda$  – параметр Удквиста, представляющий путь пластической деформации (монотонно-возрастающая положительная скалярная функция пропорциональности), функция  $f(\sigma_{ij})$  – функция пластического потенциала,  $d\varepsilon_e^p$  – интенсивность приращений пластических деформаций,  $\sigma_e$  – интенсивность напряжений.

Апробацию модели проводили на примере равнопрочного тканевого углепластика с укладкой  $[0^\circ]_{20}$ . Входными параметрами выступали упругие характеристики слоя. Также в качестве установочных использовали результаты испытаний на растяжение образцов-полосок, вырезанных по  $45^\circ$  к направлению основы. Сравнение расчетных данных с экспериментальными кривыми однократного деформирования образцов-полосок при растяжении под углами  $15^\circ$  и  $30^\circ$  к направлению основы показало, что разработанная аналитическая модель может прогнозировать упругопластическое поведение композита при комбинированном нагружении в достаточно широком диапазоне деформаций сдвига. В дальнейшем разработанная модель материала будет реализована в пакете ANSYS с помощью модуля UPF и расширена на случай повторного нагружения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект номер 23-19-20039).*

## Литература

1. J. Yang, X. Yang, H. Zhu et al. *Composite Structures*. 2018, Vol. 206, 952-959.
2. U. Mandel, R. Taubert, R. Hinterhölzl. *Composite Structures*. 2015, Vol. 132, 98-108.
3. B. Koohbor, S. Ravindran, A. Kidane. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2016, Vol. 35, No. 12, 986-995.
4. D.R. Hufner, M.L. Accorsi. *Composite Structures*. 2009, Vol. 89, No. 2, 177-185.

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭВОЛЮЦИИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ СОСТОЯНИИ ПРИ ТРЕНИИ

Борисова М. З.

*Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова СО РАН  
д. 1, ул. Октябрьская, г. Якутск, 677980, e-mail: bormaria@yandex.ru*

Известно, что при трении все физико-химические процессы и взаимодействия сосредоточены в тонком поверхностном слое. В результате на поверхности трения образуются так называемые вторичные структуры, а само явление их образования названо структурной приспособляемостью [1]. В процессе трения на образование вторичных структур затрачивается более 90 % энергии, таким образом, в процессе трения создается зона преимущественного рассеяния энергии с повышенным уровнем внутренней энергии. При условии одинакового уровня энергии системы энтропия системы будет снижаться с ростом неравномерности распределения энергии. Следовательно, энтропия трущегося тела со вторичными структурами будет меньше энтропии того же тела, находящегося в равновесии. Снижение энтропии говорит об упорядочении системы, т. е. в системе трения будут образовываться новые структуры [2, 3]. Термодинамическая устойчивость системы определяется знаком избыточного производства энтропии. Система реагирует на внешнее воздействие таким образом, чтобы уменьшить результат этого воздействия. Применительно к трибосистеме это означает, что она должна реагировать на внешнее воздействие так, чтобы уменьшить результат этого воздействия, т. е. износ. Реакция трущихся тел на трение с образованием вторичных структур способствует снижению износа, т. е. вторичные структуры осуществляют защитные функции. Следовательно, для создания наиболее износостойкого материала необходимо исследовать вторичные структуры на поверхностях трения.

Анализ изменения износостойкости образцов стали 09Г2С в процессе трения скольжения показал значительное снижение износа после термообработки ТО образцов, структурированных холодным равноканальным угловым прессованием (РКУП). Снижение износа свидетельствует о более оптимальных физико-механических свойствах стали в состоянии РКУП+ТО. Появление наноразмерных элементов в исходной субмикроструктурной структуре значительно улучшило показатели износостойкости: по массовому износу – в 2,5...2,75 раза; по интенсивности изнашивания – более чем в 2 раза. Лучшую износостойкость продемонстрировала сталь, обработанная по режиму РКУП+ТО при 350°C, для которой на стадии приработки снижение интенсивности изнашивания составило 3 – 4 раза.

Полученные результаты указывают на то, что при протекании процессов деформирования и повреждения поверхностных слоев образцов в них происходит самоорганизация структуры, обеспечивающая более эффективную диссипацию энергии. Определяющим фактором для степени износа тогда является не деформирование и разрушение на уровне отдельных зерен материала, а формирование неких мезоскопических объемов, воспринимающих трибонагрузку, от масштаба которых зависит сопротивление изнашиванию.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FWRS-2024-0036).*

*Работа выполнена с использованием приборов и оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.*

## **Литература**

1. Крагельский И. В. Трение и износ. Изд-во Машиностроение, 1968, 480 с.
2. И.С. Гершман, П.Ю. Перетягин, А.Е. Миронов, Е.И. Гершман. Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2016; Т. 75, Вып. 5, 271-277
3. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Бабель В.Г., Щедрин А.В., Чихачёва Н.Ю. и др. Трибология на основе самоорганизации. Изд-во: Lambert, 2015, 245 с.

# РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К СОЗДАНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СПЕЧЕННЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Григорьев А. С.<sup>1</sup>, Шилько Е. В.<sup>1</sup>, Дмитриев А. И.<sup>1</sup>, Заболотский А. В.<sup>2</sup>, Андреев К.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2/4 просп. Академический, Томск, 634055, Россия, grigoriev@ispms.ru, shilko@ispms.ru, dmitr@ispms.ru*

<sup>2</sup>*ООО «Группа «Магнезит», 34 ул. Солнечная, Сатка, 456910, Россия, azabolotskiy@magnezit.com*

<sup>3</sup>*Wuhan University of Science and Technology, 947 Heping Avenue, 430081, Wuhan, China, kpandreev@gmail.com*

Макроскопические механические свойства огнеупорных керамик в значительной степени определяются микроструктурой, в том числе пористостью, адгезией частиц и наличием плоскостных несплошностей различной протяженности и апертуры. Соответственно, дизайн и оптимизация характеристик огнеупорных материалов должны базироваться на анализе вкладов различных структурных элементов в эффективные свойства и взаимовлияния этих вкладов. Эффективным инструментом для проведения таких исследований является компьютерное моделирование, которое позволяет проводить параметрический анализ и выявлять влияние состава и свойств компонентов, а также поровой структуры, на макроскопические механические свойства и разрушение. Настоящая работа посвящена разработке подхода к построению мезоскопических механических моделей спеченных керамических материалов со сложной иерархической структурой на примере огнеупорной керамики на основе шпинели.

В процессе эксплуатации огнеупорные материалы, помимо термической нагрузки, могут подвергаться разнообразным динамическим воздействиям (штатным и нештатным). В частности, при взаимодействии футеровки с ломом или гидравлическим молотом во время восстановительных работ на сталелитейном производстве скорости деформации отдельных изделий из огнеупора могут достигать нескольких сотен обратных секунд. Поэтому целью данной работы было исследование влияния ключевых структурных параметров огнеупора на закономерности их механического поведения в условиях динамических (ударных) нагрузок.

В работе разработана концепция построения двухмасштабной компьютерной модели огнеупорных керамических материалов, которая базируется на представлении спеченного материала как дисперсно-упрочненного композита. Двухмасштабная модель учитывает основные составляющие его структуры: мелкозернистые области («матрица»), с которыми связаны пористость и трещиноватость материала, и упрочняющие крупные зерна («включения»). Размер области гомогенизации локальных свойств и минимальные размеры крупных (мезомасштабных) зерен и пор, явным образом учитываемых в компьютерной модели, определяются на основе анализа экспериментальных данных. Дефекты меньшего масштаба («микрорефекты») учитываются эффективно посредством задания стохастического распределения локальных значений прочности и жесткости матрицы в соответствии с заданной функцией распределения свойств. Механическое поведение каркаса пористой матрицы и крупных зерен описывается как упруго-хрупкое. В качестве условия локального разрушения применяется трехпараметрический комбинированный критерий Друкера-Прагера-Ранкина. Для моделирования механического поведения материала при динамическом нагружении применяется обобщенная динамическая форма данного критерия, базирующаяся на использовании конечного времени инкубации разрушения.

С использованием развитой модели спеченного огнеупора получены зависимости величины динамической прочности и энергии разрушения перспективного керамического огнеупорного материала на основе шпинели, а также вкладов различных структурных элементов в общее разрушение, от скорости деформирования. Полученные результаты дают понимание особенностей разрушения керамических материалов со сложной дефектной структурой, определяемой, как пористостью, так и протяженными плоскостными несплошностями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00688, <https://rscf.ru/project/22-19-00688>.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ В НИЖНИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЯХ ЧЕЛОВЕКА

Цинкер М. Ю.<sup>1,2</sup>, Кучуков А. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, д. 82, ул. Монастырская, Пермь, 614045, Российская Федерация, [cinker@fcrisk.ru](mailto:cinker@fcrisk.ru)

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», д. 29, ул. Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация, [akuchukov01@yandex.ru](mailto:akuchukov01@yandex.ru)

На сегодняшний день доказано негативное воздействие окружающей обстановки на здоровье человека, в том числе на органы дыхательной системы [1]. Для прогнозирования возникновения заболеваний органов дыхания в зависимости от факторов среды обитания, например, пылевого фактора, ведутся разработки по созданию эволюционных моделей.

В работе рассматривается нестационарное турбулентное течение газовзвеси (смесь воздуха с частицами пыли) в нижних дыхательных путях человека реальной анатомической формы, полученной на основе снимков компьютерной томографии [2], при различных режимах дыхания (с входным расходом воздуха, равным 15, 30, 60 л/мин – спокойный, средний и глубокий, соответственно).

Нижние дыхательные пути представляют из себя древовидную структуру: трахея разделяется два главных бронха, которые продолжают распадаться на более мелкие дыхательные пути. Рассматриваемая в работе геометрия, соответствующая физиологическим параметрам здорового взрослого человека.

Дыхание в общем случае является нестационарным процессом, движение воздуха происходит за счет разницы атмосферного давления и давления в легких человека. На входе в трахею на протяжении всего процесса дыхания задается постоянное атмосферное давление ( $p_m = 101325$  Па). Давление на выходе из системы бронхов изменяется по периодическому закону синусоидальному закону:

$$p_{out} = 101325 - A \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right), \quad (1)$$

где  $p_{out}$  – давление на выходе из бронхов, Па;  $t$  – время, с;  $A$  – коэффициент, отвечающий за входной расход воздуха, Па.

В результате численного моделирования были получены данные о скоростях воздушных потоков, принимающие различные значения в зависимости от режима дыхания: от 0 до 3.95 м/с для спокойного режима; от 0 до 8.31 м/с для среднего режима; от 0 до 16.41 м/с для глубокого режима.

Также в работе было проведено исследование по оценке доли осевших частиц (рассчитанных как отношение числа осевших на стенках частиц к числу вошедших в дыхательные пути) различного размера и плотностей на стенках трахеи и бронхах. Результаты показывают увеличение доли оседания по мере увеличения плотности, размера частиц и глубины дыхания. Представленная модель может быть использована для решения задач в области сохранения здоровья населения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0003).

## Литература

1. A. Grzywa-Celińska, A. Krusiński, J. Milanowski. *Ann Agric Environ Med.* 2020, 27(1), p. 1-5.
2. П.В. Трусков, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер, А.И. Кучуков. *Математическая биология и биоинформатика.* 2023, Т. 18, № 2, С. 347-366.

# ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕЧЕНИЙ МИКРОПОЛЯРНЫХ ВЯЗКИХ НЕСЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Просвиряков Е. Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 19, Мира, Екатеринбург, 620002, Россия, [evgen\\_pros@mail.ru](mailto:evgen_pros@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук

Интегрирование уравнений ньютоновской гидродинамики для описания трехмерного движения жидкости является нерешенной задачей. К настоящему времени не доказаны теоремы существования и единственности решений уравнения переноса импульса в жидкости. С момента вывода уравнений гидродинамики были начаты систематические исследования по точному интегрированию [1-3].

Подавляющее большинство исследований течений жидкостей основано на применении общепринятых уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнением несжимаемости [1-5]. Вывод уравнений Навье-Стокса основан на постулатах (гипотезах) ньютоновской механики континуальных сред, каждая частица которых рассматривается как материальная точка. Заменяя представительный объем («жирная» точка) сплошной среды материальной точкой [4]. По умолчанию считается, что представительный объем имеет три трансляционные степени свободы, описывающие поступательные движения. Использование такого подхода накладывает ограничения на исследования изменений вязкости жидкости, коэффициентов трения и других поверхностных эффектов. Учет дополнительных степеней свободы элементарного объема деформируемых сред (континуумов) приводит к тому, что напряжения Коши не уравниваются друг друга. В этом случае тензор напряжений становится несимметричным, поскольку появляются добавочные напряжения из-за учета деформационных свойств элементарных объемов жидкости при вращении. К настоящему времени такие среды называют микрополярными (среды с моментными напряжениями). Таким образом, изучая основы механики жидкости можно сделать вывод, что вращение жидкости (течение жидкости с вертикальной компонентой завихренности) может быть обусловлено не только движением жидкости в поле силы Кориолиса.

Во время доклада анонсируются не только классы решений уравнений Навье-Стокса для классических и микрополярных жидкостей, но и дается физическое применение полученных решений. Особое внимание уделено сдвиговым течениям жидкости в различных силовых полях. Было показано, что переопределенная система уравнений после редукции уравнений движения жидкости имеет нетривиальные точные решения, описывающие неоднородные течения вертикально завихренной жидкости вне поля Кориолиса [4, 5]. Эти решения описывают противотечения и усиление скоростей внутри слоя в сравнении с граничными условиями. Обсуждаются области применения полученных точных решений и направления дальнейшего построения классов точных решений уравнений гидродинамики.

## Литература

1. Ershkov S.V. Prosviryakov E.Yu. Burmasheva N.V. Christianto V. Solving the Hydrodynamical System of Equations of Inhomogeneous Fluid Flows with Thermal Diffusion: a Review. *Symmetry*. 2023. V. 15. 1825 p.
2. Burmasheva N.V. Ershkov S. Prosviryakov E.Yu. Leshchenko D. Exact Solutions of Navier–Stokes Equations for Quasi-Two-Dimensional Flows with Rayleigh Friction. *Fluids*. 2023. Vol. 8. No. 4. 123.
3. Ershkov S. Burmasheva N.V. Leshchenko D.D. Prosviryakov E.Yu. Exact Solutions of the Oberbeck–Boussinesq Equations for the Description of Shear Thermal Diffusion of Newtonian Fluid Flows // *Symmetry*. 2023. V.15. No. 9. 1730 p.
4. Baranovskii E.S. Burmasheva N.V. Prosviryakov E.Yu. Exact solutions to the Navier-Stokes equations with couple stresses // *Symmetry-Basel*. 2021. V. 13. No. 8. Article ID 1355.
5. Berestova S. A. Prosviryakov E.Yu. An Inhomogeneous Steady-State Convection of a Vertical Vortex Fluid // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2023. Vol. 19. No. 2. P. 167-186.



## МЕХАНИЧЕСКАЯ РАЗГРУЗКА МЕДИАЛЬНОЙ ЧАСТИ КОЛЕННОГО СУСТАВА – ПОИСК НОВОГО МЕТОДА

Жиляков А. В.<sup>1</sup>, Волокитина Е. А.<sup>1</sup>, Каманцев И. С.<sup>2</sup>, Кузнецов А. В.<sup>2</sup>,  
Друкаренко Н. А.<sup>2</sup>, Пестов А. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург priem@usma.ru*

<sup>2</sup> *Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург  
ks@imach.uran.ru*

<sup>3</sup> *Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского, Екатеринбург info@ios.uran.ru*

Остеоартрит (ОА) коленного сустава является дегенеративно-дистрофическим заболеванием, которое характеризуется прогрессирующим разрушением хрящевой ткани, субхондральной кости и других структур сустава. Медиальный отдел коленного сустава наиболее подвержен износу, что приводит к варусной деформации и прогрессированию ОА. Механическая перегрузка медиального мыщелка бедренной кости играет ключевую роль в развитии болевого синдрома и нарушении трофики и гомеостаза хрящевой ткани.

Таким образом механическая перегрузка медиального мыщелка является и причиной (одним из ключевых факторов развития ОА коленного сустава), и усугубляющим фактором (ускоряет прогрессирование ОА, нарушая трофику и гомеостаз хряща), и основным симптомом (приводит к болевому синдрому, воздействуя на болевые рецепторы в субхондральной кости, синовиальной оболочке и сухожильно-связочного аппарата).

Учитывая высокую распространенность и социально-экономическое бремя медиального остеоартрита коленного сустава, разработка эффективных методов его лечения является одной из приоритетных задач современной ортопедии.

В работе рассмотрены существующие методы как консервативного, так и хирургического характера для разгрузки медиального отдела сустава. Проанализированы их преимущества и недостатки. Показано, что поиск новых методов разгрузки медиального отдела коленного сустава, обладающих минимальной травматичностью, высокой эффективностью и способностью остановить прогрессирование остеоартрита, восстанавливая функцию сустава, является актуальной задачей современной ортопедии и требует дальнейших научных исследований и клинических испытаний.

Одним из перспективных направлений является применение инвазивного введения гидрогелей. Гидрогели подаются надежды как потенциальный материал для лечения остеоартрита (ОА). Они обладают механическими свойствами, схожими с естественными тканями, что делает их идеальными для замены или восстановления суставного хряща. Гидрогели также биосовместимы и могут выполнять свои функции в полости сустава, не вызывая значительных негативных реакций. Некоторые гидрогели являются биоразлагаемыми, особенно те, которые изготовлены на основе природных полимеров, таких как полигидроксиалканоаты, целлюлоза, крахмал и их комбинации с синтетическими полимерами.

В тоже время механические и реологические свойства различных классов гидрогелей играют решающую роль при их выборе для решения узкоспециализированных задач в процессе лечения человека. Несмотря на значительные успехи в разработке методов и технологий, позволяющих настраивать биомеханические свойства гидрогелей, все еще существуют проблемы, связанные с синтезом гидрогелей со сложными механическими профилями. Поэтому перспективными, на наш взгляд, являются междисциплинарные работы, направленные на улучшение биомеханики гидрогелей.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО СТАРЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ NI-CR-MO

Гибадуллина А. Ф., Хотин В. А., Половов И. Б.

*ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», д. 19, ул. Мира,  
г. Екатеринбург, Свердловская область, 620002, A.F.Gibadullina@urfu.ru*

Коррозионностойкие сплавы, разработанные на основе системы Ni-Cr-Mo, широко используются в химической промышленности, а также рассматриваются в качестве кандидатных материалов для ядерно-энергетических установок нового поколения с активной зоной и теплоносителем в виде расплава солей галогенидов, в условиях, сочетающих радиационное воздействие и контакт с агрессивными средами при повышенных температурах. Однако при длительном высокотемпературном воздействии на сплавы данной группы, вследствие выделения частиц вторых фаз и процессов упорядочения, изменяются коррозионные и механические свойства.

Целью данной работы является изучение влияния длительного старения на фазовую стабильность и комплекс механических свойств коррозионностойких сплавов на основе системы Ni-Cr-Mo с различным содержанием Cr и Mo – VDM® Alloy C-4, XH62M-BИ, VDM® Alloy 59, HASTELLOYS® HYBRID-BC1®. Для выбранных сплавов проводилось исследование влияния длительного старения при температурах 500...700 °С в течение 500...5000 ч на механические свойства сплавов. Пропорциональные плоские образцы испытывались на разрывной машине Instron 3382 в соответствии с ГОСТ 1497 при различных температурах.

Показано, что механические свойства исследуемых никелевых сплавов чувствительны к старению при выбранных температурах – с повышением длительности выдержки происходит упрочнение сплава с постепенным снижением пластичности. При относительно коротких временах до 1000 ч значительное упрочнение ( $\Delta\sigma_{0,2} = 350$  МПа,  $\Delta\sigma_B = 400$  МПа), сопровождаемое падением пластических характеристик, наблюдается преимущественно в диапазоне 550–600 °С; тогда как с повышением продолжительности старения эффект упрочнения расширяется и наблюдается во всём диапазоне выбранных температур – 500...700 °С.

Также результаты механических испытаний образцов всех исследуемых сплавов показали, что при повышенных температурах на кривых растяжения наблюдается эффект Портевена – Ле Шателье, проявляющийся в виде повторяющихся осцилляций нагрузки и связанный с выделением и растворением при деформации частиц типа Ni<sub>2</sub>(Cr, Mo).

# ВЛИЯНИЕ НИЗКОМОДУЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ $h$ -BN НА СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ $TiB_2$ - $ZrB_2$ - $SiC$

Лукьянец М. П.<sup>1</sup>, Буяков А. С.<sup>1</sup>, Буякова С. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИФПМ СО РАН, д. 2/4, пр. Академический, г. Томск, 643055, Россия,  
email:mpv97@ispms.ru, alesbuyakov@gmail.com, sbuyakova@ispms.ru

Среди функциональных материалов особый интерес вызывают тугоплавкие керамические композиты, состоящие главным образом из боридов, нитридов и карбидов переходных металлов IV-V групп и обладающие высокими твердостью, прочностью, износостойкостью. Однако повсеместное применение керамик существенно ограничивается вследствие присущей им хрупкости. В зависимости от подхода повышение трещиностойкости керамик может быть достигнуто путем добавления различных армирующих включений: а) композиционные, формирующие структуру типа «композит в композите» [1]; б) отличающиеся высокой твердостью и жесткостью (углеродные нанотрубки, SiC) [2]; в) низко модульные включения, способствующие бифуркации трещины на относительно слабых границах матрицы-включения (графит, гексагональный нитрид бора  $h$ -BN) [3]. Цель исследования состоит в изучении влияния низко модульных включений  $h$ -BN на трещиностойкость композитов системы  $TiB_2$ - $ZrB_2$ - $SiC$ .

Композиты получены методом горячего прессования под давлением 40 МПа с изотермической выдержкой в течение 20 минут при температуре 1850°C. Порошковые смеси предварительно подвергались механической активации. Содержание  $h$ -BN, вводимого в матрицу  $TiB_2$ - $ZrB_2$ - $SiC$ , составило 0, 3 и 5 об.%. Фазовый состав образцов определялся с помощью рентгенофазового анализа (РФА), напряжения второго рода оценены, как произведение величины микроискажений кристаллической решетки соответствующей фазы на ее модуль упругости. Трещиностойкость определена методом трехточечного изгиба образца в форме балки с V-надрезом.

Согласно РФА, исследуемые материалы представлены твердым раствором  $(Zr_{0,83}Ti_{0,17})B_2$ , SiC и  $h$ -BN, интегральная интенсивность рефлексов которого отражает концентрацию.

Обнаружено, что введение до 5 об. %  $h$ -BN приводит к повышению трещиностойкости исследуемых материалов от  $4,330 \pm 0,065$  до  $6,010 \pm 0,090$  МПа·м<sup>1/2</sup>, для 0 об.% и 5 об.%  $h$ -BN, соответственно. Дальнейшее повышение концентрации  $h$ -BN приводит к снижению величины  $K_{IC}$ , что, по-видимому, определяется низкой трещиностойкостью самого  $h$ -BN.

Известно, что  $h$ -BN характеризуется анизотропным КТР. Следовало ожидать, что введение  $h$ -BN приведет к формированию остаточных сжимающих напряжений в матрице  $TiB_2$ - $ZrB_2$ - $SiC$ , однако оценкой напряжений второго рода, как произведение величины микроискажений кристаллической решетки на модуль упругости соответствующей фазы, было обнаружено, что увеличение концентрации  $h$ -BN приводит к снижению микронапряжений, действующих в  $(Zr_{0,83}Ti_{0,17})B_2$ .

Тем самым можно сделать вывод о том, что рост трещиностойкости обусловлен не сжимающими напряжениями, оказывающими диссипативный эффект на энергию трещины, а реализацией механизма Кука-Гордона, когда низкая прочность относительно слабого интерфейса между матрицей и низко модульными включениями  $h$ -BN создает условия для бифуркации контактирующей с ним трещины с соответствующим делением ее энергии.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0009.

## Литература

1. Fang Z., Lockwood G., Griffio A. *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1999. – Т. 30. – С. 3231-3238.
2. Tian W.B., Kan Y.M., Zhang G.J., Wang P.L. *Mater. Sci. Eng. A* – 2008. – Vol. 487, №1–2 – P. 568–573.
3. Buyakov A. S. et al. *Ceramics International*. – 2021. – Т. 47. – №. 8. – С. 10582-10589.

# РАЗРУШЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (СГ-П0.5 И Al2O3) В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ С СОХРАНЕНИЕМ ФРАГМЕНТОВ

Банникова И. А.\*, Савельева Н. В., Банников М. В., Уваров С. В.

ИМСС УрО РАН, 1, Ак. Королева, Пермь, 614013, Россия, \*malgacheva@icmm.ru

Проведено экспериментальное исследование поведения образцов из керамики на основе оксид-алюминия плазменного напыления и композита на основе силицированного графита СГ-П0.5 в условиях динамического индентирования с целью фундаментального исследования механизмов разрушения материала для последующей верификации модели, описывающей поведение материала в широком диапазоне скоростей нагружения. Образцы подвергались динамическому индентированию в условиях сохранения фрагментов на установке разрезных стержней Гопкинсона «РСГ-25». В роли индентора выступал стальной шарик с диаметром 16 мм. Реконструкция образцов после индентирования, и съемка до и после (Рис. 1) на рентгеновском томографе Bruker позволили точно определить направление магистральных трещин в образце и вклад дефектной структуры материала в формирование поверхности разрушения.

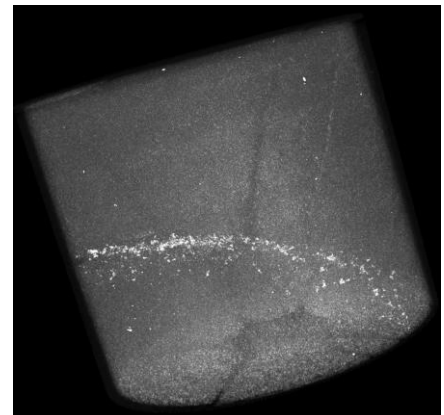


Рис. 1. Изображение реконструированного образца №5.4 из СГ-П0.5 после индентирования, полученной на Bruker

Проведен анализ статистики фрагментации обоих материалов. Вид распределений фрагментов по массе  $N(m)$  отличался от тех, что были получены в условиях квазистатического или динамического нагружений [1].

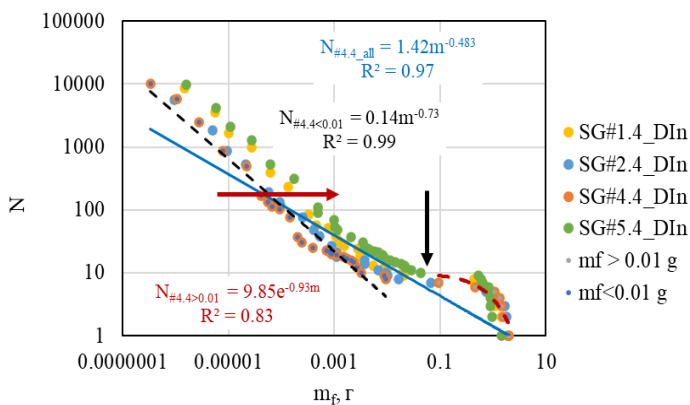


Рис. 2. Кумулятивное распределение фрагментов по массе, полученное в условиях динамического индентирования цилиндров из СГ-П0.5. Логарифмические оси

морфологии поверхности разрушения фрагментов образца из Al2O3 оптическими методами, было обнаружено, что шероховатость поверхности вдоль (от места удара к противоположной поверхности) отличается, и можно выделить до трех областей с различными профилями рельефа (Рис. 3). Это может свидетельствовать о стадийности зарождения и роста магистральной и дочерних трещин, характерных для хрупкого разрушения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30041), <https://rscf.ru/en/project/21-79-30041/>.

Распределение фрагментов с массой, меньшей 0.01 г, описывается степенным законом, а крупных фрагментов с массой, большей 0.01 г, - экспоненциальным или логарифмическим законом. Более пологий перегиб на распределениях  $N(m)$  связываем с переходом от одного механизма разрушения материала к другому. В результате исследования

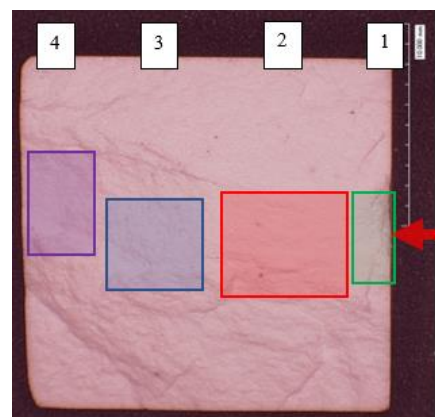


Рис. 3. Поверхность фрагмента образца №1\_DIn из Al2O3. Стрелкой показано место и направление удара шарообразным индентором

## Литература

1. I.A. Bannikova., N.V. Saveleva, S.V. Uvarov, M.V. Bannikov, P.E. Panfilov, O.B. Naimark. *Russian Physics Journal*. 2023. Vol. 66, No.9, 990–997. DOI 10.1007/s11182-023-03034-8.

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВС-КОМПОЗИТА СИСТЕМЫ Fe-Ti-Ni-B-C

Нохрина А. В.<sup>1</sup>, Пугачева Н. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия, nohrina2000@mail.ru

До сих пор при эксплуатации механического оборудования часто происходят поломки, приводящие к авариям. Поломки в основном вызваны изломами деталей. В настоящее время все больше проводится исследований различных систем СВС-композитов [1-4]. Они обладают высокой прочностью, жесткостью и износостойкостью. Такие композиты используются в горнодобывающей промышленности, в качестве износостойкого покрытия рабочих поверхностей. Целью данного исследования является с помощью проведения испытаний на ударную вязкость и трехточечный изгиб СВС-композита системы Fe-Ti-Ni-B-C определить возможность применения их в динамических условиях.

Композит был изготовлен методом СВС [5]. Испытания на ударную вязкость проводились на маятниковом копре Tinius Olsen IT542M в соответствии с ГОСТ 9454-78 на образцах типа 1 в количестве трех штук, с поперечным сечением 10 x 10 мм. Эталонным образцом была взята сталь HARDOX 500, для сравнительной характеристики была использована сталь 40X. Испытания на поперечный изгиб проводились по ГОСТ 20019-74 на образцах типа А. Скорость испытания 0,2 мм/ мин., расстояние между осями опор 30 мм.

Средний химический состав композита определяли по десяти участкам размером 2 x 2 мм на сканирующем микроскопе Tescan VEGA II XMU с волновой приставкой INCA WAVE 500.

Средний химический состав композита, вес. %: 17,91 ± 0,4 В; 8,54 ± 0,5 С; 24,08 ± 1,4 Ti; 35,47 ± 1,5 Fe; 13,99 ± 0,5 Ni.

В результате исследования излома некоторым участкам характерен сотовый рельеф. Присутствуют в рельефе и фасетки скола. Замечены также в микрорельефе гребни и небольшие области дендритов. В основном рельеф излома состоит из ямок, образовавшихся по причине пластического течения металла. Характер разрушения СВС-композита – вязкий с элементами хрупкого. Изломы однородные кристаллические. Композит имеет крайне низкую ударную вязкость KCU равную 0,02 МДж/ м<sup>2</sup>. Образцы стали 40X имеют вязкость выше 0,35 МДж/ м<sup>2</sup>.

Испытания на изгиб показали, что композит имеет предел прочности на изгиб R<sub>бm30</sub> меньше (220-800 МПа), чем сталь 40X (1590 МПа).

По результатам исследования механических свойств СВС-композита системы Fe-Ti-Ni-B-C стало понятно, что использовать композиты данного химического состава в качестве материала для деталей, работающих в условиях ударного нагружения и кручения, невозможно.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме №124020700063-3.

## Литература

1. Пугачева Н.Б., Николин Ю.В., Сенаева Е.И., Малыгина И.Ю. Физика металлов и металловедение. 2019, Т. 120, Вып. 11, 1174-1180.
2. Пугачева Н.Б., Быкова Т.М., Сенаева Е.И., Горулева Л.С. Физическая мезомеханика. Тезисы докладов Международной конференции, 2023, 554-555.
3. Пугачева Н.Б., Николин Ю.В., Быкова Т.М., Сенаева Е.И. ФММ, 2022, Т.123, Вып. 1, 47-54.
4. Пугачева Н.Б., Нохрина А.В., Николин Ю.В., Задворкин С.М. Физическая мезомеханика. Тезисы докладов Международной конференции, 2023, 182-183.
5. Николин Б.В., Матевосян М.Б., Кочугов С.П., Пугачева Н.Б. Патент на изобретение №2680489. Способ изготовления многослойной износостойкой пластины.

# СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИТОВ С АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

Черкасова Т. С., Гладковский С. В., Саврай Р. А., Петрова С. В.

*ИМАШ УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

В работе изучены структура, физико-механические свойства, абразивная износостойкость и строение поверхности износа алюмоматричных композитов Al–25%B<sub>4</sub>C; Al–25%SiC; Al–12,5%B<sub>4</sub>C+12,5%SiC; Al–25%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также материала основы – скомпактированного порошка алюминия ПА–4 с размером частиц 25–130 мкм. Размер карбидных и оксидных порошковых частиц составлял 5–13 мкм (B<sub>4</sub>C), 90–150 мкм (SiC) и 4–8 мкм (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Образцы для исследования были получены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН методом горячей прокатки при температуре 500 и 560 °С [1].

Методами оптической металлографии и EBSD-анализа выявлен характер распределения упрочняющих фаз в алюминиевой матрице и показано, что введение частиц B<sub>4</sub>C и SiC способствуют ее измельчению. Установлено влияние состава композитов и дисперсности частиц упрочнителя на условный предела текучести при сжатии ( $\sigma_{0,2}^c$ ) и микротвердость (HV0,05). Показано, что наибольшее значение  $\sigma_{0,2}^c = 186$  МПа достигается на образцах композита Al–25%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с мелкодисперсным упрочнителем (размер частиц 4–8 мкм). Трибологические испытания по схеме «палец-пластина» показали, что наибольшей абразивной износостойкостью обладают алюмоматричные композиты с крупными (25% SiC) и разноразмерными (12,5%B<sub>4</sub>C–12,5%SiC) частицами упрочнителя. Высокая интенсивность изнашивания композита Al–25%B<sub>4</sub>C ( $I_b = 4,67$  мм<sup>3</sup>/м), представленная в табл. 1, может быть связана с характером распределения более дисперсных по сравнению с порошками Al частиц B<sub>4</sub>C в виде сетки агломератов по границам зерен алюминиевой матрицы.

Таблица 1– Интенсивность изнашивания ( $I_b$ ) и параметры шероховатости поверхности износа ( $R_a$  и  $R_t$ ) исследуемых материалов

Состав материала	$I_b$ , мм <sup>3</sup> /м	$R_a$ , мкм	$R_t$ , мкм
Al	2,66	1,26	11,61
Al – 25 % B <sub>4</sub> C	4,67	2,03	16,91
Al – 25 % SiC	0,74	0,30	2,73
Al – 12,5 % B <sub>4</sub> C – 12,5% SiC	0,73	0,25	2,87
Al – 25 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,83	1,52	12,84

Методом растровой электронной микроскопии и оптической профилометрии установлено, что процесс изнашивания изученных композитов развивается как по абразивному, так и адгезионному механизму с образованием характерных канавок износа и ямок отрыва. Изучение топографии поверхности износа показало, что композитам с наименьшей интенсивностью абразивного изнашивания соответствуют минимальные значения показателей шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_t$  (табл. 1).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН (тема № 124020600045-0).

## Литература

1. Гладковский С.В., Петрова С.В., Черкасова Т.С., Пацелов А.М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2023, Вып. 1, 55-62.

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТИПА ТОРНАДО

Казачинский А. О.<sup>1</sup>, Крутова И. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 8, ул. Комсомольская, г. Снежинск Челябинской области, 456776, Россия, [IUKrutova@mephi.ru](mailto:IUKrutova@mephi.ru)

В данной работе проведено аналитическое и численное моделирование сложных течений политропного газа в восходящих закрученных потоках воздуха. В математической модели детально рассматриваются процессы возникновения и развития трехмерного стационарного движения воздуха, при иницировании закрутки потока силой Кориолиса – являющейся инерционной силой, возникающей от вращения Земли вокруг своей оси.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью понимания сути физических процессов, происходящих в восходящих потоках, необходимость тщательного и глубокого изучения природы возникновения вихрей (торнадо, смерчи, тропический циклон) для раннего предупреждения и эффективной борьбы с их разрушительными последствиями.

Для выбранной математической модели в виде системы уравнений газовой динамики с учетом действия сил тяжести и Кориолиса поставлены начальные условия, позволяющие численно находить решения для описания стационарного трехмерного течения газа в восходящих закрученных потоках.

Предложенная математическая модель позволяет дать оригинальную трактовку причины возникновения закрутки воздуха соответствующего направления. С помощью численного метода характеристик численно найдены решения для коэффициентов рядов, которые определяются через систему уравнений газовой динамики с учетом действия сил тяжести и Кориолиса, которая описывает трехмерное нестационарное придонное течение политропного газа в восходящих закрученных потоках.

В представленной модели трехмерного течения политропного газа представлен анализ и исследование коэффициентов сходящихся рядов для газодинамических параметров различных классов по данным натуральных наблюдений, которые повторяют природное явление. Кроме того, рассчитаны мгновенные линии тока для нестационарного случая трехмерного течения политропного газа.

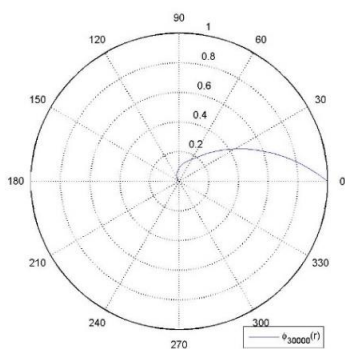


Рис. 1. Результаты расчетов для торнадо класса F3

## Литература

1. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. – Екатеринбург: УрГУПС, 2020. – 399 с.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса. – Екатеринбург: УрГУПС, 2019. – 181 с.
3. Казачинский А.О., Крутова И.Ю. Построение течений в придонной части восходящих закрученных потоков как решение одной характеристической задачи Коши : Препринт. – Снежинск : издательство СФТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – 60 с.

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Шарапова В. А.<sup>1</sup>, Максимова Т. А.<sup>1</sup>, Рябухин О. В.<sup>1</sup>, Швейкин В. П.<sup>1,2</sup>, Иванов В. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 19, улица Мира, город Екатеринбург, 620002, Россия, v.a.sharapova@urfu.ru

<sup>2</sup>ИМАШ УрО РАН, 34, улица Комсомольская, город Екатеринбург, 620049, Россия

Стерилизации подвергались пробирки для забора крови, предоставленные ОАО «Здравмедтех». Пробирки имеют два типоразмера по внутреннему диаметру 1,5 и 1 см, и по высоте обе пробирки составляют 8,3 см, изготавливаются из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), химическая формула которого  $(C_{10}H_8O_4)_n$ , толщина стенок пробирок – 1,2 и 1 мм соответственно. Для проведения исследований из пробирок нарезались образцы размером 4 × 4 мм.

Для облучения образцы пробирок размещались на конвейере и, для набора поглощенной дозы, перемещались в камеру облучения. Формирование поглощенной дозы обеспечивалось определенной скоростью конвейера. Для проведения исследований использовались дозы 5, 10, 15, 20 и 25 кГр [1, 2].



Рис. 1. Размещение облучаемых образцов пробирок на конвейер

После расчета констант и проведения моделирования в режиме траекторий движения электронов в полиэтилентерефталате получили визуальную плоскостную картину.

Сложная картина совокупности процессов в объеме полиэтилентерефталата включает рассеяние электронов, в том числе и многократное в электронной подсистеме исследуемой среды, приводящее к ее ионизации и формированию характеристического рентгеновского и, в малой степени, тормозного излучений в результате переходов орбитальных электронов верхних оболочек на вакансии в нижних оболочках и торможения электронов в электромагнитном поле ядер и орбитальных электронов соответственно.

В целом процесс моделирования движения электронов в среде, из которой изготовлен стерилизуемый объект, позволяет оценить энергетические и дозовые распределения, характеризующие взаимодействие электронов в данном случае с ПЭТФ и более полно понимать процесс формирования поглощенной дозы в стерилизуемой продукции и ее распределение по глубине.

### Литература

1. ГОСТ ISO 11137-1-2011. Стерилизация медицинской продукции. Радиационная стерилизация. Часть 1. Требования к разработке, валидации и текущему контролю процесса стерилизации медицинских изделий. – Введ. 01-01-2013. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. – 35 с.
2. ФГУП «ВНИИФТРИ» / Методика радиационного контроля процесса радиационной стерилизации на промышленной стерилизационной установке с ускорителем электронов УЭЛР-10-10С Инновационно-внедренческого центра радиационной стерилизации Уральского Федерального Университета // Свидетельство об аттестации МРК № 46163.15009/01.00294-2010 от 05 февраля 2015 г.



# ПОВЫШЕНИЕ АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ ГРАФИТИЗИРОВАННОЙ СТАЛИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАКАЛКОЙ

Шарапова В. А.<sup>1</sup>, Филиппов М. А.<sup>1</sup>, Швейкин В. П.<sup>1,2</sup>, Фурман И. Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 19,  
улица Мира, город Екатеринбург, 620002, Россия, v.a.sharapova@urfu.ru

<sup>2</sup>ИМАШ УрО РАН, 34, улица Комсомольская, город Екатеринбург, 620049, Россия

Графитизированные стали (ГС) по химическому составу представляют собой заэвтектоидные углеродистые или низколегированные стали, в которых часть углерода выделена в виде графита [1, 2]. Поэтому по структуре механическим и служебным свойствам ГС рассматривают как промежуточный материал между инструментальными сталями и чугунами с компактными формами графита.

Образцы ГС 135С1.5ГЛ выплавлены на кафедре литейного производства УрФУ, в 20-килограммовой индукционной печи, были разлиты в слитки квадратного сечения 55 × 55 мм и охлаждались в кокилях. Из слитков были изготовлены ударные образцы, которые подвергали закалке в воду от различных температур в диапазоне 900 – 1150 °С. Помимо ударной вязкости, твёрдости и металлографического исследования, изучили абразивную износостойкость и фазовый состав образцов методом рентгеноструктурного анализа.

Абразивную износостойкость образцов оценивали с помощью методики изнашивания при трении по закреплённому абразиву, реализованной при помощи специальной установки на базе строгального станка. Образцы с площадью рабочей части 10 × 10 мм совершали возвратно-поступательное движение по шлифовальной бумаге 14А32МН481 (ГОСТ 6456-82) на корундовой основе. Длина одного рабочего хода образцов составляла 0,135 м, путь трения образца за одно испытание при скорости движения 0,158 м/с составлял 60 м. Нормальная нагрузка, действующая на образец, 10 кг (удельная нагрузка 1 МПа). Величина поперечного смещения шлифовальной бумаги за один двойной ход образца равнялась 1,2 мм.

Абразивная износостойкость определялась по результатам двух параллельных испытаний (эталон – валковая сталь 9Х5МФС), сравнение результатов проводили через относительные единицы:

$$\varepsilon = \Delta M_{\varepsilon} / \Delta M_0,$$

где  $\varepsilon$  – относительная износостойкость,  $\Delta M_{\varepsilon}$  – потеря массы образцов стали 9Х5МФС после закалки от 900 °С и низкого отпуска с твердостью 60 HRC (0,40 г),  $\Delta M_0$  – потеря массы испытуемого образца.

Таблица 1 – Абразивная износостойкость и твёрдость образцов графитизированной стали 135С1.5ГЛ после закалки от различных температур нагрева

Температура нагрева, °С	$\Delta M$ , г	$\varepsilon$	HRC	HV <sub>50</sub> , рабочая поверхность после износа, ГПа
900	0,220	1,82	60	10,2
1000	0,200	2,00	50	10,3
1100	0,160	2,50	49	10,5
1150	0,120	3,30	48	10,6

Повышением температуры нагрева под закалку ГС 135С1.5ГЛ от 900 до 1150 °С можно, повышать абразивную износостойкость ГС вследствие образования остаточного метастабильного аустенита и высокоуглеродистого мартенсита в металлической основе в исходном перед испытанием состоянии.

## Литература

1. Р.П. Тодоров, М.В. Николов. Структура и свойства отливок из графитизированных сталей. М.: Металлургия, 1976. 168 с.
2. М.А. Филиппов, А.А. Филиппенков, Г.Н. Плотников. Износостойкие стали для отливок. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 358 с.

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ВОЗДУХА В ВОЗДУХОПРОВОДЯЩИХ ПУТЯХ ЧЕЛОВЕКА

Цинкер М. Ю.<sup>1,2</sup>, Свинцова П. Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, д. 82, ул. Монастырская, Пермь, 614045, Российская Федерация, [sinker@fcrisk.ru](mailto:sinker@fcrisk.ru),

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», д. 29, ул. Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация, [appolinaryasd@gmail.com](mailto:appolinaryasd@gmail.com)

Многочисленными исследованиями доказано негативное влияние загрязнения атмосферного воздуха на распространенность заболеваний органов дыхания. Применение математических моделей позволяет прогнозировать изменение состояния здоровья человека обусловленное негативным воздействием различных факторов среды обитания, в том числе загрязненностью атмосферного воздуха пылевыми частицами.

Работа посвящена исследованию нестационарного течения многофазной смеси газов и твердых пылевых частиц различного дисперсного состава, а также оценке оседания пылевых частиц в воздухопроводящих путях человека.

Трехмерная геометрия воздухоносных путей от носовой полости до 5 генерации бронхов была построена программном продукте Blender на основе объединения участков верхних [1] и нижних воздухоносных путей [2], построенных на основе данных компьютерной томографии.

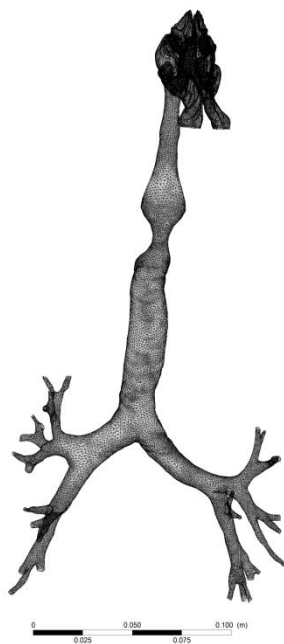


Рис. 1. Объемная сетка воздухоносных путей

Вдыхаемый воздух рассматривается как газозвесь. Движение несущей газовой фазы описывается с использованием эйлерового подхода (модель вязкой жидкости). Твердые пылевые частицы являются дисперсной несомой фазой, описание которой выполняется с использованием лагранжевого подхода.

На входе в носовую полость задавалось постоянное давление равное 101325 Па на выходах из бронхов давление менялось по периодическому закону  $p_{out} = 101325 - A \sin(\frac{\pi}{2} t)$ . Амплитуда  $A$  была подобрана итерационно, чтобы входные расходы воздуха ( $Q$ ) составляли 15, 30 и 60 л/мин.

Исследование нестационарного течения воздуха в воздухоносных путях выполнено численно с использованием программного пакета Ansys CFX. Получены скорости потока воздуха в разные моменты вдоха при  $Q=15, 30$  и  $60$  л/мин. Максимальная скорость воздушного потока достигает  $14.78$  м/с (при  $Q=15$  л/мин) в момент времени  $t=1$  секунда, соответствующему середине вдоха. Выполнены оценки оседания частиц различного дисперсного состава и плотности в воздухоносных путях человека. Результаты исследования могут быть использованы при решении задач в области сохранения здоровья населения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0003).

## Литература:

1. П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер, А.В. Математическая биология и биоинформатика. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 349-366. DOI: 10.17537/2021.16.349
2. П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер, А.И. Кучуков Математическая биология и биоинформатика. – 2023. – Т. 18. – № 2. – С. 347-366.

## СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА ПРИ 700 °С

Литовченко И. Ю.<sup>1,2</sup>, Аккузин С. А.<sup>1</sup>, Полехина Н. А.<sup>1</sup>,  
Спиридонова К. В.<sup>1</sup>, Осипова В. В.<sup>1,2</sup>, Ким А. В.<sup>1,2</sup>, Чернов В. М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2/4,  
пр. Академический, г. Томск, 634055, Российская Федерация, [litovchenko@ispms.ru](mailto:litovchenko@ispms.ru),  
[s.a.akkuzin@gmail.com](mailto:s.a.akkuzin@gmail.com), [nadejda89tsk@yandex.ru](mailto:nadejda89tsk@yandex.ru), [kseni\\_ya\\_almaeva@mail.ru](mailto:kseni_ya_almaeva@mail.ru)

<sup>2</sup>Национальный Исследовательский Томский государственный университет, 36, пр. Ленина  
г. Томск, 634050, Российская Федерация, [lera.linnik.1999@mail.ru](mailto:lera.linnik.1999@mail.ru), [aneeta.2001@list.ru](mailto:aneeta.2001@list.ru)

<sup>3</sup>АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара», 5а, ул. Рогова, г. Москва, 123098, Российская  
Федерация, [vmchernov@bochvar.ru](mailto:vmchernov@bochvar.ru)

Малоактивируемые хромомарганцевые аустенитные стали системы Fe–12Cr–(20–25)Mn–C были предложены [1] в качестве альтернативы хромоникелевым аустенитным сталям типа ЭК-164 и ЧС-68, используемым в настоящее время в качестве конструкционных материалов оболочек тепловыделяющих элементов и других элементов первой стенки ядерных реакторов, а также в качестве возможных материалов термоядерных энергетических установок. Существенным преимуществом этих сталей является быстрый спад наведенной радиоактивности (малоактивируемость), достигаемый за счет отсутствия (минимизации) в составе сталей высокоактивируемых элементов (Ni, Mo, Co, и др.). Поскольку в таких сталях стабилизация аустенита осуществляется только за счет Mn и C, то исследованные составы хромомарганцевых сталей [1] уступали по стабильности хромоникелевым сталям.

В наших работах [2, 3] разработаны новые композиции малоактивируемых аустенитных сталей с повышенной стабильностью аустенита (26-29 масс. % Mn) и повышенным содержанием сильных карбидообразующих элементов. Исследованы особенности их микроструктуры и механические свойства в условиях растяжения в широком интервале температур. Поскольку стали предполагаются для работы при температурах до 650 – 700 °С, необходимы исследования термической стабильности их микроструктуры и механических свойств в условиях длительного старения. В настоящей работе представлены результаты структурных исследований и механических испытаний новой малоактивируемой аустенитной стали Fe–11Cr–26Cr–W–V–Ti–Ta–Zr–0,25C в двух структурных состояниях – закаленном и холоднодеформированном (ХД) после длительных (100 ч.) отжигов при 700 °С.

Показано, что зеренная и микродвойниковая структура стали в результате длительного старения остается стабильной. Основные структурные превращения обусловлены выделением дисперсных частиц карбидов  $M_{23}C_6$  (M – Cr, Mn, Fe). Указанные частицы выделяются по границам зерен, микро- и нанодвойников (сформированных в результате ХД), а также в виде оболочек на грубодисперсных частицах типа MC (M – Ti, Ta, Zr, V, W) и вблизи этих частиц. Поперечные размеры частиц, выделяющихся на двойниковых границах ограничены толщиной двойниковых пластин и не превышают десятков нм. Дисперсные частицы, закрепляющие двойниковые границы препятствуют их миграции. Механические свойства стали после длительных отжигов сохраняются на достаточно высоком уровне, предел текучести не менее 350 МПа (при 650 °С), удлинение до разрушения не менее 14 % (старение ХД состояния).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00802,  
<https://rscf.ru/project/22-19-00802/>.

### Литература

1. Иванов Л.И., Платов Ю.М. Радиационная физика металлов и ее приложения. Изд-во Интерконтакт Наука, 2002, 300с.
2. I. Litovchenko, S. Akkuzin, N. Polekhina, K. Almaeva, E. Moskvichev, V. Linnik, A. Kim, V. Chernov, *Metals*. 2022, 12(12), 2106.
3. I. Litovchenko, S. Akkuzin, N. Polekhina, K. Spiridonova, E. Moskvichev, V. Osipova, A. Kim, V. Chernov, A. Kuznetsov, *Metals*. 2023, 13(12), 2015.

# СКВОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В I-II РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ С ВВОДОМ В МОДЕЛЬ СУБСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА

Ключанцев В. С.<sup>1,2</sup>, Шутов А. В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 15, проспект Академика Лаврентьева, Новосибирск, 630090, Россия, v.kliuchantsev@g.nsu.ru, alexey.v.shutov@gmail.com*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, 2, улица Пирогова, Новосибирск, 630559, Россия*

Работа направлена на изучение влияния нелокального подхода интегрального типа на процессы накопления повреждений в металлических материалах под воздействием смешанного режима нагрузки, включающего как растягивающие, так и сдвиговые напряжения. Из-за особенностей деформаций в области кончика трещины, выбрана геометрически нелинейная модель материала. Введение нелокальности интегрального типа в правила накопления повреждений расширяет нашу модель за счет новых параметров материала, таких как размер субструктуры, и улучшает точность наших расчетов [1]. Отличие от локальных моделей заключается в том, что наша модель лишена патологической зависимости результатов от параметров дискретизации, что гарантирует сходимость решений при повышении точности дискретизации [2, 3, 4].

Для более глубокого понимания процессов накопления повреждений и разрушения в смешанном режиме нагружения I/II мы представляем новые ядра делокализации [4], которые учитывают неоднородность полей напряжений и деформаций в зоне разрушения. Мы также исследуем процедуры нормализации ядер: нормализация по "приемнику" или "источнику". При этом процедура нормализации на основе приемника обеспечивает математическую строгость и инвариантность постоянных полей, в то время как процедура на основе источника обеспечивает физическую обоснованность и постоянство интеграла от делокализуемой величины.

Результатом нашей работы стал инструмент моделирования, который подходит для анализа процессов накопления повреждений и разрушения. Мы продемонстрировали практическую применимость нашего нового подхода, используя модель материала, откалиброванную по реальным экспериментальным данным [2, 4]. В частности, эффективность нашей модели проявляется при конечно-элементном анализе разрушения компактных образцов в смешанном режиме "растяжение-сдвиг".

В отличие от традиционных ядер делокализации, предложенные семейства ядер включают дополнительный параметр калибровки, что позволяет более точно описать поведение конструкции при смешанном режиме нагружения. Этот подход также позволяет контролировать форму предсказываемой диаграммы КІс-КІІс [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, код проекта 23-19-00514.

## *Литература*

1. Z. P. Bažant, M. Jirásek. *Journal of engineering mechanics*. 2002, 11, 128, 1119-1149
2. A.V. Shutov, V. S. Klyuchantsev. *International Journal of Plasticity*. 2021, 144, 103061
3. A.V. Shutov, V. S. Klyuchantsev. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2023, 103, 1, e202100434
4. A.V. Shutov, V. S. Klyuchantsev. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023, 292, 109656.

## УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 20X13 ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Кузнецов В. П., Воронцов И. А., Хадыев М. С. Параскивая Е. О., Сергеев А. В., Гончаров Д. С.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 19, Мира, Екатеринбург, 620003*

Обработка трением с перемешиванием (ОТП) сталей и сплавов – это метод упрочнения поверхностных слоев вращающимся инструментом. Основными технологическими параметрами ОТП являются частота вращения и линейная скорость перемещения инструмента, прикладываемая нормальная сила и геометрия инструмента. Нормальная сила и скорость вращения и перемещения инструмента определяют коэффициент трения и количество фрикционного тепла, выделившегося в процессе ОТП.

Перспективным направлением развития метода ОТП является легирование поверхности и создание поверхностных композитов за счет перехода материала инструмента [1]. Большие возможности реализации этих методов открываются в процессе обработки поверхностей деталей на современных обрабатывающих центрах при применении твердосплавных цилиндрических инструментов с плоским и сферическим торцом [2, 3].

В данной работе выполнено исследование закономерностей изменения структуры и фазового состава стали 20X13 в состоянии поставки с твердостью 180 НВ после ОТП твердосплавным инструментом. ОТП поверхностей образцов стали 20X13 толщиной 25 мм проводилось цилиндрическим инструментом WC-Co (10%) диаметром 10 мм со сферической рабочей частью радиусом 10 мм на обрабатывающем центре МА-600 (Okuma) при нормальной силе 3000 Н, скорости вращения инструмента 2500 об/мин и подаче 50, 75 и 125 мм/мин.

Установлено, что при ОТП наблюдается переход вольфрама в поверхностный слой стали в виде частиц  $W_2C$  с формированием слоистой композитной структуры. Выявлены три зоны упрочнения для каждого из режимов обработки. В областях с высоким содержанием вольфрама значение микротвердости выше, чем в областях с низким содержанием вольфрама. Максимальное значение микротвердости 771  $HV_{0,05}$  достигнуто при подаче 50 мм/мин, а максимальная глубина 610 мкм упрочнения поверхностного слоя характерна для подачи 75 мм/мин. Основываясь на анализе светлопольных изображений, определен средний размер частиц карбида дивольфрама, который составляет  $350 \pm 20$  нм. Размер мартенситного зерна находится в пределах от 1,5 мкм до 1,7 мкм.

### *Литература*

1. Azizieh, M.; Kim, H.S.; Kokabi, A.H.; Shahraki, B.K. *Fabrication of AZ31/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites by friction stir processing. Rev. Adv. Mater. Sci. 2011, 28, 85–89.*
2. Voropaev V.V., Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Barabashova A.A. *Impact of Friction Stir Processing Parameters on Forming the Structure and Properties in AISI 420 Steel Surface Layer // XIX International scientific-technical conference “The Ural school-seminar of metal scientists-young researchers”. KnE Engineering. 2019. P. 158–162.*
3. Hajime Yamamoto, Shodai Koga, Kazuhiro Ito, Yoshiki Mikami, et al. *Fatigue strength improvement due to alloying steel weld toes with WC tool constituent elements through friction stir processing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2022) 119:6203–6213.*

## ВОДОРОДНАЯ ДИАГНОСТИКА СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Яковлев Ю. А.<sup>1</sup>, Логинов В. П.<sup>1,2</sup>, Полянский А. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИИПМаш РАН, дом 61, Большой пр., г. Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «НПК ЭПТ», 194021, дом 28 литер А, пом/(ком) 20-Н/86, ул. Политехническая, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

В последние годы наблюдается повышенный научный интерес к изучению влияния малых концентраций водорода на механические характеристики металлов и сплавов. Еще в конце 19 века установили, что прочность, пластичность, сопротивление усталостному разрушению конструкционных материалов сильно зависит от количества растворенного в них водорода. С этого времени началось всестороннее изучение данного вопроса.

В конце 20-го века были предприняты значительные усилия для решения проблемы металлургического водорода. Они позволили добиться успехов по снижению концентрации водорода в отливках металлов. Это привело к возрастанию качеству металлопродукции и создало впечатление об окончательном решении всех проблем с водородом в металлах.

Вместе с этим в последние годы снова возникли проблемы в производстве различных сталей и алюминиевых сплавов. Источником этих проблем, по косвенным признакам, является наличие большого количества водорода с низкой энергией связи. Это явление ставит проблему влияния водорода на свойства материалов на новый уровень. Ведь предельно допустимые концентрации влияния водорода за 100 лет снизились примерно в 100 раз.

Повышение интереса к теме водородного охрупчивания можно объяснить несколькими факторами:

- Внедрение в промышленность аддитивных технологий. Где в исходных порошках металлов содержится огромное количество водорода, которое делает готовое изделие хрупким.
- Использование водорода в качестве экологически-чистого источника энергии.
- Увеличение доли использования высокопрочных материалов, в которых водородная деградация механических свойств начинается с концентраций на порядок ниже, чем у классических металлов.
- Возникновение проблем при производстве классических материалов – алюминиевых сплавов, стального проката из-за сильно изменившихся технологий производства.

Последнему пункту будет уделено особое внимание в докладе. Будут представлены результаты водородной диагностики образцов стали 20, алюминиевых сплавов и других конструкционных материалов современного производства. Проведено сравнение распределения концентрацией водорода в них, с материалами прошлого технологического цикла производства. Сделаны выводы о критических концентрациях и технологиях производства современных конструкционных материалов.

# ОБРАЗОВАНИЕ МИКРОДЕФЕКТОВ В ГЕОМАТЕРИАЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Бунин И. Ж.<sup>1</sup>, Кочанов А. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н.В. Мельникова РАН,  
4, Крюковский тупик, Москва, 111020, Россия, bunin\_i@mail.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей образования и развития микродефектов в образцах горных пород (уголь, гранит, песчаник и кварц) при нетепловом воздействии мощных наносекундных электромагнитных импульсов (МЭМИ [1-3]). Обработку геоматериалов наносекундными МЭМИ проводили в воздухе при стандартных условиях и следующих электрофизических параметрах импульсного воздействия: передний фронт, длительность и частота повторения импульсов 2–5, 4–10 нс и 100 Гц соответственно, амплитуда импульса 25 кВ; энергия импульсного разряда (энергия накопительного конденсатора) ~0.1 Дж, напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке длиной 5 мм ~ $10^7$  В×м<sup>-1</sup>. Диапазон изменения времени электромагнитной импульсной обработки составлял  $t_{обр.}=10-300$  с. Для оценки изменений микроструктуры поверхности образцов использовали аналитическую растровую электронную микроскопию (РЭМ–РСМА), а для образцов угля дополнительно применяли рентгеновскую компьютерную томографию.

Морфология, субструктура и особенности развития микротрещин в образцах углей, песчаниках и гранитах существенно отличались друг от друга. Для песчаника и гранита образование и распространение микротрещин происходило преимущественно по границам зерен. Образцы угля, по-видимому, характеризовались смешанным механизмом разрушения. В целом большинство микротрещин, образовавшихся в горных породах в результате воздействия МЭМИ, имели характер трещин нормального разрыва. Определен размер раскрытия микротрещин, проанализированы их структурные особенности. Обсуждаются возможные механизмы образования микротрещин, а именно: дезинтеграция проводящих образцов угля вследствие влияния скин-эффекта; образование микроканалов неполного электрического пробоя в образцах кварца; механизм миграционной (межслоевой) и/или электронно-релаксационной поляризации диэлектрических минералов.

Структурные изменения наиболее выражены для образцов угля: по данным РЭМ, в результате обработки МЭМИ на поверхности образцов происходило формирование системы микротрещин, величина раскрытия которых составляла 0.2-2.5 мкм. Траектория распространения магистральных трещин преимущественно прямолинейная; реже наблюдались извилистые траектории трещин. Методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ), позволяющим локализовать и измерять в трех координатах структурные малококонтрастные микродефекты, в отдельных приповерхностных срезах образцов угля обнаружены отдельные протяженные микротрещины с раскрытием до 10 мкм. Следует отметить, что для (проводящих) образцов, на поверхности которых после нетеплового воздействия МЭМИ обнаружены многочисленные трещины (РЭМ), в объеме угля (РКТ), новые микродефекты не наблюдались.

По всей видимости, развитие микротрещин на поверхности образцов угля может быть связано с проявлением скин-эффекта – уменьшением амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды, в результате чего диссипация энергии электромагнитного поля происходит не равномерно по сечению образца, а преимущественно в поверхностном слое. Результаты экспериментов представляют научный интерес в области физики прочности и микромеханики разрушения.

## *Литература*

1. И.Ж. Бунин, Н.С. Бунина, В.А. Вдовин и др. *Известия РАН. Серия физическая.* 2001, Т. 65, № 12, 1788-1792.
2. В.А. Черепенин. *Успехи физических наук.* 2006, Т. 176, № 10, 1124-1130.
3. В. А. Вдовин, Р. А. Денисов, С. А. Сапецкий, В. А. Черепенин. *Радиотехника и электроника.* 2023, Т. 68, № 9, 910-916.

# МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ: ПРИМЕНЕНИЕ К ОПИСАНИЮ ФОРМИРОВАНИЯ МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРЫ

Подседерцев А. Н.<sup>1</sup>, Трусов П. В.<sup>1</sup>, Кондратьев Н. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д. 29,  
Комсомольский проспект, г. Пермь, 614990, Российская Федерация

Актуальной задачей современной промышленности является повышение эффективности термомеханической обработки металлов и сплавов для получения изделий с необходимыми для эксплуатации свойствами. В процессе термомеханической обработки для многих сплавов одним из механизмов, наиболее сильно влияющих на физико-механические свойства материала, является мартенситное превращение. Мартенситная фаза обладает более высоким пределом текучести (по сравнению с аустенитом); при этом новая фаза формируется в виде тонких пластин, которые образуют пакеты. Для детального исследования этого твердотельного фазового превращения необходимы математические модели с явным учетом формирования и эволюции структуры новой фазы.

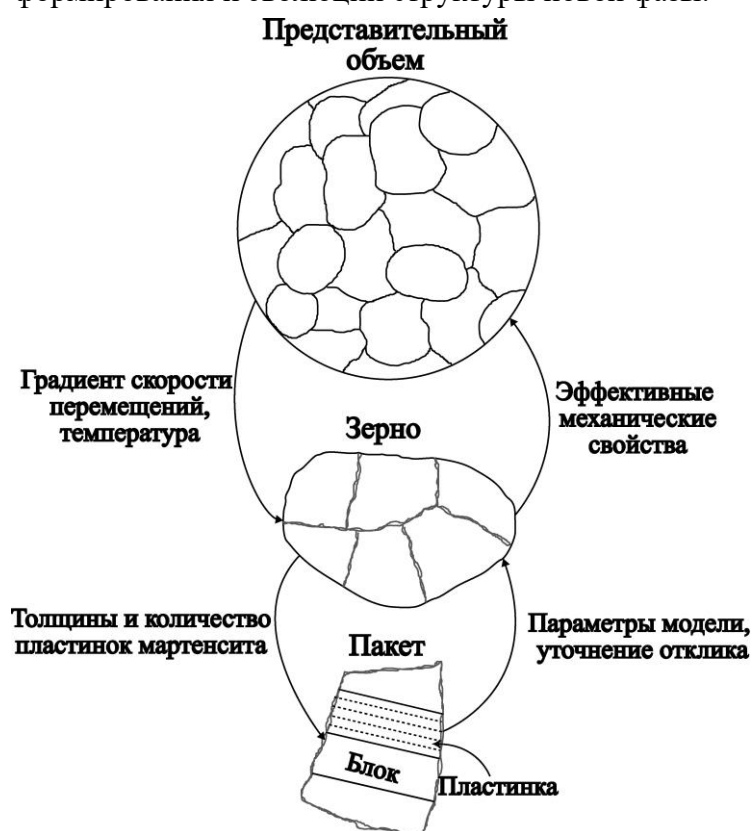


Рис. 1. Схема и связь структурно-масштабных уровней модели

Введение геометрического описания мартенситной структуры (формы и размеров пластинок).

С использованием разработанной модели получены результаты для нержавеющей стали 08X18H10 (AISI 304). Проведена идентификация и верификация параметров подмодели мезоуровня-I. Проведены вычислительные эксперименты для анализа формирования мартенситной структуры с различной ориентацией пластинок и кристаллографических решеток родительских зерен.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

В настоящей работе представлена многоуровневая математическая модель неупругого деформирования, включающая описание мартенситного превращения. В модели рассматривается три структурно-масштабных уровня (рис.1). Макроуровень ассоциируется с представительным объемом поликристалла, состоящим из зерен – элементов мезоуровня-I. На мезоуровне-I решается задача определения напряженно деформированного состояния зерна и соответствующих внутренних переменных модели. По состоянию зерен определяется отклик и эффективные механические свойства представительного объема поликристалла. Элемент мезоуровня-II ассоциирован с пакетом мартенсита. Этот уровень вводится для уточнения отклика материала за счет явного



# АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ РЕШЕТЧАТЫХ СТРУКТУР ДЛЯ КРЫЛА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА

Федоренко А. Н.<sup>1,2</sup>, Федулов Б. Н.<sup>2</sup>, Юргенсон С. А.<sup>3</sup>, Ломакин Е. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия, a.fedorenko@skoltech.ru,

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, b.fedulov@mail.ru, evlomakin@yandex.ru,

<sup>3</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, sjurg@yandex.ru

В данной работе изучается возможность применения конструкционного элемента на основе оболочек, подкрепленных пирамидальным заполнителем, для крыла сверхзвукового самолета. Подобная конфигурация может изготавливаться штамповкой или гибкой лент с последующей сваркой. В предыдущих работах авторов было показано, что эффективность пирамидальной формы подтверждается решением задачи о топологической оптимизации плиты при изгибе [1, 2]. Общий вид и габариты предлагаемой конструктивно-силовой схемы крыла приняты по аналогии с [3] и представлены на Рис. 1(а). В качестве материала рассмотрен композит на основе углеткани и термопластичного связующего. В концевой части предполагается использование полимерного сотового наполнителя. В качестве нагрузок принята аэродинамическая удельная нагрузка на крыло, равная  $450 \text{ кг/м}^2$ , что является средней величиной по разрабатываемым в мире проектам. Толщины обшивки и ребер жесткости подбирались с шагом 500 мм по направлению от борта фюзеляжа, для чего использовались методы параметрической оптимизации с ограничением по прогибу (Рис.2(б)). В применяемых численных расчетах на основе метода конечных элементов учитывалась геометрическая нелинейность, что позволило подбирать толщины с условием исключения возможных форм потери устойчивости. Однако, по этой причине необходимые толщины оказались существенно выше чем те, которые были получены в ранних работах при рассмотрении консоли крыла традиционной компоновки [4]. Для сравнения также выполнены расчеты варианта конструкции крыла с традиционным силовым набором. В целом, конструкция на основе пирамидальных элементов обладает более высокой жесткости, но требует усиления ребер наполнителя в зонах соединения двух сегментов крыла и фюзеляжа.

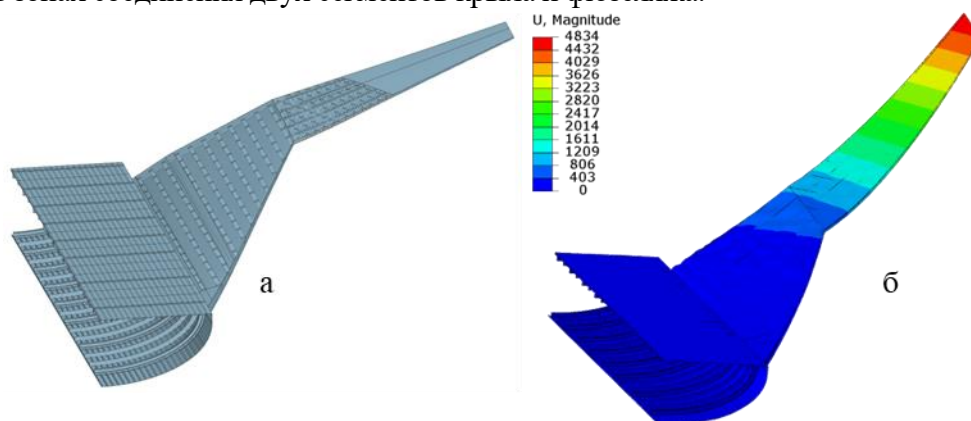


Рис. 1. а – Общий вид крыла; б – Перемещения крыла при изгибе (мм)

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-11-20230-П.

## Литература

1. Fedulov B. N. et al. Construction plate enforced by metamaterial elements. *Procedia Structural Integrity*. 2020. Т. 28. С. 155-161.
2. Ломакин Е. В. и др. Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. № 6. С. 45-54.
3. System-Level Experimental Validations for Supersonic Commercial Transport Aircraft Entering Service in the 2018-2020 Time Period [Электронный ресурс]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20130011026>. Дата обращения 04.02.2024.
4. Sobieszczanski J. et al. Structural design studies of a supersonic cruise arrow wing configuration. *Proc. of the SCAR Conf.*, 1976.

# МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГТД НА ПТИЦЕСТОЙКОСТЬ

Лепешкин А. Р.<sup>1</sup>, Аунг К. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 4, Волоколамское шоссе, Москва, 125993, Россия, [lepeshkin.ar@gmail.com](mailto:lepeshkin.ar@gmail.com)

Повреждения элементов авиационной техники при столкновениях с птицами существенно снижают уровень безопасности полетов в гражданской и военной авиации, приводят к росту числа аварий и катастроф, увеличению затрат на эксплуатацию, связанных с необходимостью выполнения восстановительного ремонта поврежденного летательного аппарата.

Проведен анализ столкновений авиационной техники с птицами в условиях эксплуатации. Для элементов авиалайнера, на которые чаще всего приходится удары, то 45÷50% – это попадания в двигатель (это можно объяснить как большой площадью сечения входного канала воздухозаборника, так и его всасывающим действием). До 25% приходится на попадания в крыло, 7% – попадания в кабину пилотов, остальное – повреждения фюзеляжа, стоек шасси, носового обтекателя и хвостового оперения. Наиболее опасным является попадание птицы в двигатель самолета. При таком столкновении высок риск деформации лопаток вентилятора и различных ступеней компрессора, так же возможен обрыв лопаток с повреждением газоздушного тракта и последующих ступеней, помпаж двигателя с последующим отказом, в особо тяжелых случаях возможно возникновение пожара в двигателе [1-3].

Проведение исследовательских, технологических и конструкторских работ в области птицестойкости элементов летательных аппаратов (ЛА) и авиационных ГТД, а также проведение сертификационных и специальных испытаний является необходимым условием, позволяющим снизить вероятность и серьезность таких столкновений и существенно повысить безопасность полетов.

Рассмотрены существующие методы стендовых испытаний элементов и узлов авиационной техники на птицестойкость. Проведен анализ зарубежного оборудования для испытаний зарубежной авиационной техники на птицестойкость. В данной работе разработана методика проведения специальных испытаний вращающихся лопаток вентилятора газотурбинных двигателей (ГТД) на птицестойкость на разгонном стенде с использованием усовершенствованной конструкции пневматической пушки и отечественного испытательного оборудования. Приводятся результаты испытаний вращающихся лопаток колеса вентилятора авиационного ГТД на птицестойкость на разгонном стенде с вертикальным расположением пневмопушки и оценка повреждаемости лопаток вентилятора после испытаний. Проведено сравнение результатов экспериментальных и расчетных исследований с использованием метода конечных элементов. Разработанные методики можно использовать для испытаний элементов летательных аппаратов и деталей двигателей на специальных стендах. Стендовые специальные испытания авиационной техники на птицестойкость с использованием разработанной методики позволяют верифицировать расчетные модели поведения тела птицы и материала узлов и деталей при ударном нагружении, достоверно оценить птицестойкость и повреждаемость узлов и деталей при относительной скорости удара, которая может быть воспроизведена при стрельбе из пневмопушки, разработать рекомендации для улучшения конструкции и повышения технологичности узлов и деталей авиационной техники.

## Литература

1. Лепешкин А.Р., Ильинская О.И., Маликов С.Б. Динамика и прочность авиационных газотурбинных двигателей. М.: Изд-во МАИ, 2020. – 100 с.
2. А. Lepeshkin. The blade releasing method for test of engine casing containment // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). Сер. "ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2013". 2013. С. 63749.
3. B.F. Shorr B.F., N.N. Serebriakov, G.V. Melnikova et al. Computational and experimental study of bird failure at different speeds of collision with a flexible plate // The International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020). Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1891. 012050.

# ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СЛОЖНОГО НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГЦК-МЕТАЛЛОВ

Грибов Д. С., Трусов П. В., Митрополит И. Ю.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29,  
Комсомольский проспект, 614000, Пермь, Россия, [gribovds@pstu.ru](mailto:gribovds@pstu.ru)*

Создание и применение математических моделей для описания технологических процессов обработки металлов и сплавов позволяет улучшать существующие и разрабатывать новые режимы термомеханической обработки деталей и конструкций с использованием ограниченного объема экспериментальных данных. Основным элементом таких моделей являются определяющие соотношения (конститутивные модели). В последние годы широко развиваются конститутивные модели, основанные на многоуровневом описании процессов деформирования с введением внутренних переменных (параметров, характеризующих эволюционирующую структуру), ориентированных на реальное физическое строение металлов [1]. Данный подход позволяет разрабатывать модели для описания поведения широких классов материалов при различных программах термомеханических воздействий.

В процессах сложного деформирования происходит существенная перестройка дефектных структур, включая увеличение плотностей дислокаций на системах скольжения, образование барьеров на расщеплённых дислокациях, и другие [2]. Для описания таких процессов в работе используется подход, основанный на введении внутренних переменных (параметров, характеризующих мезо- и микроструктуру) и эволюционных уравнений для них [1]. Основной задачей работы является описание пластического деформирования поликристаллического агрегата с ГЦК–решёткой и различной энергией дефекта упаковки при сложном нагружении, осуществляемое с помощью разработанной многоуровневой модели.

Модель описывает поведение материала на трёх уровнях: макроуровень, мезоуровень-1, мезоуровень-2; макроуровень служит для описания поведения представительного макрообъёма, мезоуровни – зерен и субзерен. Неупругое деформирование полагается реализуемым движением краевых дислокаций при достижении касательных напряжений критического уровня (определяемого законом упрочнения для каждой системы скольжения). Структурные уровни связаны прямыми и обратными связями; в качестве воздействия на мезоуровень-1 передаются градиенты скоростей перемещений (принимается гипотеза Фойгта). 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 (передаваемых с мезоуровня-2). Определяемые на мезоуровне-1 касательные напряжения на системах скольжения передаются в качестве воздействия на мезоуровень-2, где описывается эволюция плотностей дефектов. В модели введено разделение плотностей дислокаций на системах скольжения на положительные и отрицательные. Описан процесс образования барьеров на расщеплённых дислокациях. Закон упрочнения учитывает величину плотностей дислокаций и барьеров на системах скольжения. Проведён ряд численных экспериментов на сложное циклическое деформирование, анализ увеличения предела текучести для материалов с различной величиной энергии дефекта упаковки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

## *Литература*

1. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. — 605 с. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV
2. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. — М.: Атомиздат, 1972. — 600 с.

# ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Буров А. Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 53, пр. Мира, Красноярск, 660049, Россия, aeburov@ict.nsc.ru

Технология непрерывной намотки широко применяется при изготовлении композитных оболочек, являющихся несущими элементами сосудов высокого давления с металлическим лайнером (МКБВД) [1, 2]. Совокупность уникальных свойств, включающих высокие показатели весовой эффективности, долговечности и коррозионной стойкости, расширила в последнее время область использования МКБВД от аэрокосмической техники до химического, автомобильного и спортивного сегментов промышленности.

Моделирование возможных предельных состояний и прогнозирование несущей способности являются неотъемлемой частью обеспечения требований прочности и надежности конструкции МКБВД. Эта задача осложняется необходимостью учета рассеяния механических характеристик материала силовой оболочки как следствие статистического разброса прочности армирующего волокна и несовершенств технологии изготовления [2].

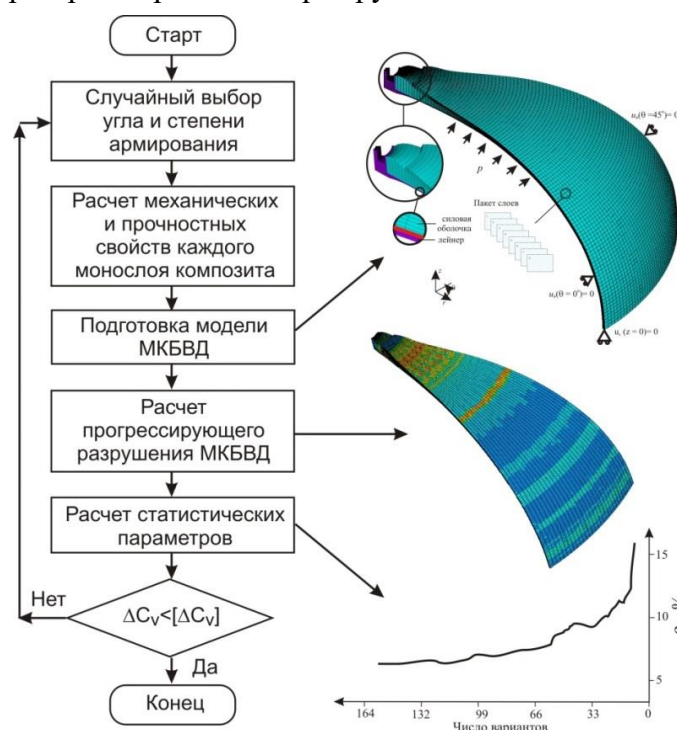


Рис. 1. Схема вероятностного моделирования несущей способности МКБВД

В настоящей работе на основе вероятностного подхода и модели прогрессирующего разрушения выполнен анализ влияния вариаций параметров силовой оболочки на несущую способность МКБВД объемом 200 литров, изготовленного путем непрерывной намотки углеродного волокна, пропитанного эпоксидным связующим, на тонкий титановый лайнер (рис. 1).

Расчетная конечно-элементная модель, представляет собой повторяющийся  $45^\circ$  сегмент конструкции МКБВД, включающий лайнер и силовую композитную оболочку. В качестве параметров композитной оболочки, которые больше всего чувствительны к технологическим факторам, приняты угол намотки, объемное содержание волокна и предел его прочности. Модель прогрессирующего разрушения основана на представлениях континуальной

механики поврежденности, связывающей процессы накопления повреждений и деградацию механических свойств материала с изменением напряженно-деформированного состояния (НДС).

Вариация свойств композита ведет к вариативности НДС и процесса накопления повреждений и, в конечном итоге, к статистическому рассеянию предельного давления. Результаты вероятностного анализа позволяют количественно оценить близость состояния МКБВД к его предельному состоянию, что позволяет, в том числе, решать задачи оценки прочностной надежности конструкции при заданных параметрах нагружения.

## Литература

1. Vasiliev V. V. *Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing*. Blacksburg VA: Ridge Publishing, 2009, 690 p
2. *Несущая способность и безопасность металлокомпозитных баков космических аппаратов / под ред. В. В. Москвичева, Н. А. Тестоедова*. Новосибирск: Наука, 2021, 440 с.

# ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ КАРБИДОВ В МИКРОСТРУКТУРЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Соболева Н. Н.<sup>1,2</sup>, Мушников А. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения УрО РАН имени Э.С. Горкунова, д. 34, ул. Комсомольская,  
Екатеринбург, 620049, Россия; [natashasoboleva@list.ru](mailto:natashasoboleva@list.ru)

<sup>2</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, 18, ул. С. Ковалевской,  
Екатеринбург, 620108, Россия

Объемная доля первичных карбидов является одним из показателей, влияющих на износостойкость композиционных покрытий. Одним из современных и перспективных методов оценки объемной доли первичных карбидов в микроструктуре композиционных покрытий является применение нейронных сетей для анализа изображений и выделения областей, занятых карбидами [1–3].

Архитектура модели и искусственной нейронной сети, используемой нами в решении задачи распознавания карбидов, накладывает ряд ограничений на параметры изображений в обучающем наборе. Во-первых, нельзя использовать изображения, высота или ширина которых меньше 224 пикселей. Во-вторых, все изображения должны быть одного размера. При этом исходные изображения микроструктур композиционных покрытий могут быть различных размеров и, более того, с разным соотношением сторон. Поэтому в работе рассмотрены различные подходы к обучению нейронной сети:

- изменение размера изображений обучающего набора на какой-либо фиксированный размер с применением интерполяций, тестирование на изображениях исходного размера;
- изменение размера изображений обучающего и тестового наборов;
- нарезка изображений обучающего набора на фрагменты, тестирование на изображениях исходного размера;
- нарезка изображений обучающего и тестового наборов;
- нарезка и двойной анализ (усреднение результатов для фрагментов исходного и уменьшенного до половины размера изображений).

Кроме того, для повышения точности сегментации изображений варьировали в широких пределах гиперпараметры обучения нейронной сети.

Показано, что наилучший результат работы сети на тестовых изображениях по метрике mIoU был получен для сети, обученной с размером батча 320 и скоростью обучения  $1 \times 10^{-3}$  с использованием метода, в котором обучение сети проводилось на фрагментах исходных изображений, а тестирование – методом двойного анализа.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 124020600045-0 и ИФМ УрО РАН по теме «Аддитивность» № 121102900049-1. Микроскопические изображения получены с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

## Литература

1. N. Soboleva, A. Mushnikov. *Materials Today Communications*. 2024, Vol. 38, 108276.
2. Н.Н. Соболева, А.Н. Мушников. *Frontier Materials & Technologies*. 2023, № 3, с. 95 – 102.
3. D. Rose, J. Forth, H. Henein, T. Wolfe, A.J. Qureshi. *Computational Materials Science*, 2022, Vol. 210. 111391.

# ПРОЧНОСТЬ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ БРИКЕТОВ

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

<sup>1</sup> ООО Спайдермаш, 54, Студенческая, Екатеринбург, 620912, Россия [100pli100@mail.ru](mailto:100pli100@mail.ru)

<sup>2</sup> ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С.Горкунова УрО РАН, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия [n.a.babailov@urfu.ru](mailto:n.a.babailov@urfu.ru)

<sup>3</sup> ФГАУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, 19, Мира, 620002, Екатеринбург, Россия [j.n.loginov@urfu.ru](mailto:j.n.loginov@urfu.ru)

Объектом исследований является углеродсодержащий материал фракционного состава –2,0 +0,0 мм (содержание углерода 85%), оценка его брикетированности (окускования) с использованием разных видов органических связующих, например мука по ГОСТ 26574-2017, сорт 2; декстрин по ГОСТ 6034-74, сорт 1; крахмал по ГОСТ Р-51985-2002; лигносульфонат (ЛСТ) по ТУ 2455-028-00279580-2004; меласса по ГОСТ-30561- 2017.

Изучены брикеты при следующих технологических параметрах брикетирования: напряжение прессования – от 25 до 100 МПа; содержание сухих связующих (указаны выше) – 3 %, 5 %, 7 %, при различных вариантах влажности брикетируемой шихты – 3 %, 6 %, 9 %;

Цилиндрические брикеты получены прессованием с использованием метода одностороннего прессования в закрытой матрице на вертикальном гидравлическом прессе с номинальным усилием 100 кН. Определены следующие механические свойства полученных брикетов: плотность; ударная прочность (или прочность на сбрасывание) и прочность на сжатие. Определение прочностных характеристик выполнено по ГОСТ 21289-75 и ГОСТ 25471-82.

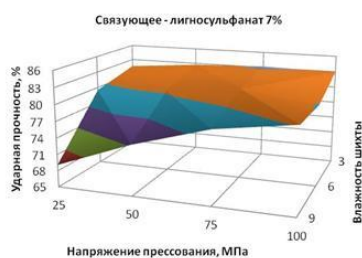


Рис. 1. Ударная прочность брикетов из углеродсодержащего материала со связующим лигносульфанат 7%

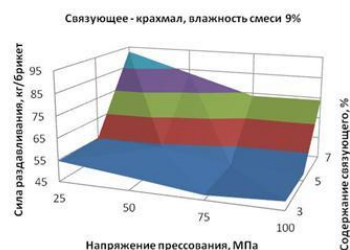


Рис. 2. Сила раздавливания брикетов с использованием связующего – крахмал (влажность смеси 9%)

Выполнено изучение прочностных свойств «сырых» брикетов (т.е. брикетов сразу после процесса брикетирования, без сушки и вылеживания), а также «сухих» брикетов. Сушка брикетов осуществлена при температуре 240°C в течение 20 минут. Для определения прочностных свойств металлургических брикетов были изготовлены образцы для испытания (по 10 образца на каждую точку измерения). На рис.1 приведены результаты исследований динамической прочности брикетов (прочность на сбрасывание), с содержащим связующего лигносульфанат – 7%, в зависимости от давления прессования и влажности шихты. На рис. 2 приведены результаты исследования силы раздавливания брикетов с использованием связующего – крахмал (влажность смеси 9%).

## Литература

1. Б.М. Равич. Брикетирование руд. М. : Недра, 2082, 183 с.
2. В.М. Авдохин. Основы обогащения полезных ископаемых. М.: Изд-во МГУ, 2006. 417 с.
3. Handbook of Powder Technology / Edited by A.D. Salman, M.J. Hounslow, J.P.K. Seville. Volume 11, P. 3-1390 (2007).
4. Polianski L. I., Babailov N. A., Loginov Yu. N., Pervukhina D. N. Industrial recycling of technogenic wastes and mineral ore processing // AIP Conference Proceedings.2016. Vol. No. 040046.10.1063/1.4967103
5. Бабайлов Н.А. Полянский Л.И. Логинов Ю.Н. Брикетирование отсева металлургической извести и параметры, позволяющие повысить эффективность процесса // Металлург.–2016.

# ОПТИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ БРИКЕТОВ ИЗ ОКСИДА МАГНИЯ

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

<sup>1</sup> ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С.Горкунова УрО РАН, 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия [n.a.babailov@urfu.ru](mailto:n.a.babailov@urfu.ru)

<sup>2</sup> ООО Спайдермаш, 54, Студенческая, Екатеринбург, 620912, Россия [100pli100@mail.ru](mailto:100pli100@mail.ru)

<sup>3</sup> ФГАУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, 19, Мира, Екатеринбург, 620002, Россия [j.n.loginov@urfu.ru](mailto:j.n.loginov@urfu.ru)

Выполнены экспериментальные исследования прочности брикетов из оксида магния ( $MgO$ ), используемых в металлургической и огнеупорной промышленности. Брикеты с содержанием  $MgO$  75 – 90 получены методом сухого брикетирования, т.е. без связующего и влаги. проведены на вертикальном гидравлическом прессе усилием 100 кН. Гранулометрический состав брикетируемого материала: 0 – 1 мм. Изучены брикеты при следующих технологических параметрах брикетирования: напряжение прессования – от 25 до 100 МПа.

Цилиндрические брикеты получены методом одностороннего прессования в закрытой матрице на вертикальном гидравлическом прессе с номинальным усилием 100 кН. Определены следующие свойства брикетов: плотность; ударная прочность (или прочность на сбрасывание) и прочность на сжатие. Определение прочностных характеристик выполнено по ГОСТ 21289-75 и ГОСТ 25471-82.

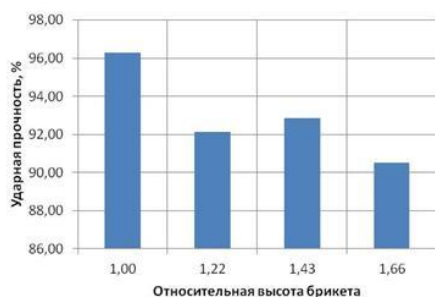


Рис. 1. Ударная прочность брикетов из  $MgO$  при напряжении прессования 25 МПа

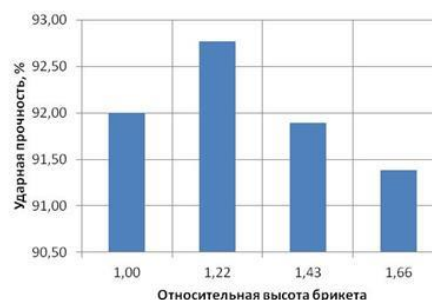


Рис. 2. Ударная прочность брикетов из  $MgO$  при напряжении прессования 40 МПа

В работе изучены прочностные свойства «сырых» брикетов (т.е. брикетов сразу после процесса брикетирования, без сушки и дальнейшего вылеживания на воздухе).

На рис.1 приведены результаты исследований динамической прочности брикетов из оксида магния при давлении прессования, равном 25 МПа, в зависимости от относительной высоты брикета. На рис.2 приведены результаты исследования динамической прочности брикетов из оксида магния при давлении прессования, равном 40 МПа, в зависимости от относительной высоты брикета.

В работе определены оптимальные размеры брикета (по параметру относительной высоты брикета) для получения требуемых механических свойств. Оптимальная относительная высота брикетов в интервале значений, равном 1,00 – 1,22.

## Литература

1. Б.М. Равич. Брикетирование руд. М. : Недра, 2082, 183 с.
2. В.М. Авдохин. Основы обогащения полезных ископаемых. М.: Изд-во МГУ, 2006. 417 с.
3. Handbook of Powder Technology / Edited by A.D. Salman, M.J. Hounslow, J.P.K. Seville. Volume 11, P. 3-1390 (2007).
4. Polianski L. I., Babailov N. A., Loginov Yu. N., Pervukhina D. N. Industrial recycling of technogenic wastes and mineral ore processing // AIP Conference Proceedings.2016. Vol. No. 040046.10.1063/1.4967103
5. Бабайлов Н.А. Полянский Л.И. Логинов Ю.Н. Брикетирование отсева металлургической извести и параметры, позволяющие повысить эффективность процесса // Металлург.–2016.

# ОСОБЕННОСТИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРМОНАГУЖЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ДЕФОРМАЦИЙ

Маслов С. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии Наук (ИМАШ РАН), д. 4, Малый Харитоньевский пер., г. Москва, 101990, Российская Федерация, [maslovsv@inbox.ru](mailto:maslovsv@inbox.ru)

Рассматриваются особенности проведения натуральных исследований термонапряженного состояния современных энергетических установок [1], эксплуатируемых при температурах в 20–550<sup>0</sup>С при возникновении в их элементах упругопластических деформаций. Воздействие высоких температур приводит к искажению выходных сигналов тензорезисторных преобразователей из-за значительного возрастания параметров дрейфа и ползучести тензорезисторов [2]. Для уменьшения погрешностей, связанных с дрейфом тензорезисторов, предлагается использовать полученную зависимость среднеквадратичного отклонения выходного сигнала  $S$  от средней величины возрастания температурной характеристики  $\Delta\xi_t$ :

$$S(\Delta\xi_t) = \frac{\sqrt{2}K^*}{1-3K^*}(\Delta\xi_t),$$

Величину  $\Delta\xi_t$  предлагается определять в процессе натурального эксперимента; для коэффициента  $K^*$  в диапазоне изменения влияющих параметров получена величина

$$K^* = 2,5 \times 10^{-2}.$$

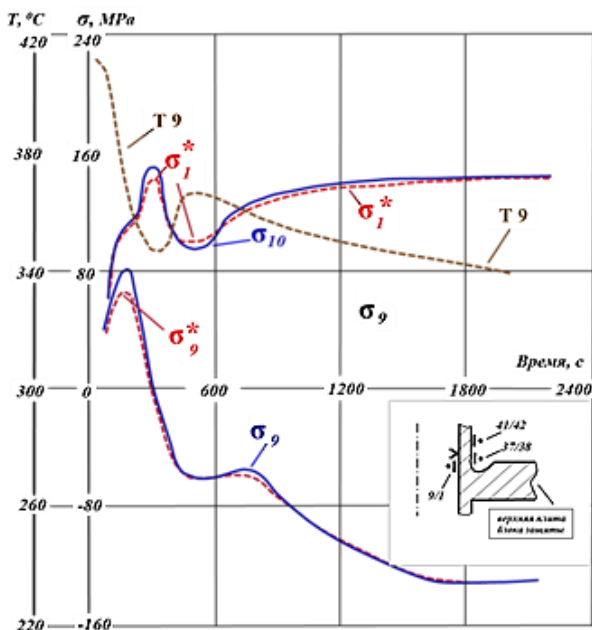


Рис. 1. Исправленные (с индексом\*) функции изменения напряжений в зоне трубной доски теплообменника

Определение ползучести тензорезисторов осуществляется на образцах, нагреваемых протекающим электрическим током и подвергаемых деформации, синусоидально изменяющейся во времени [3]. В качестве модели изменения ползучести во времени можно использовать упрощённую экспоненциальную зависимость с постоянными пределом и показателем ползучести. Для учёта влияния условий возникновения упругопластического состояния металла в зонах измерений используется аппарат деформационной теории ползучести с он-лайн контролем критерия интенсивности измеряемых деформаций. Применение указанных методик приводит к необходимости внесения поправок в результаты измерений, полученные по традиционной методике [4]. На рисунке 1 приведены примеры исходных и исправленных (с индексом «\*») функций изменения напряжений в натурной конструкции.

## Литература

1. Н.А. Махутов., М.М. Гаденин. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 4. С. 24-34.. EDN: PNCKQX, DOI 10.31857/S0235711920040094
2. С.В. Маслов. Заводская лаборатория, 2022 Т. 88. № 12, С. 64-74. EDN: IZFRNX, DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-12-64-74.
3. М.С. Алексеева, М.А. Алимов, В.Е. Архипов и др. Исследования и обоснование прочности и безопасности машин. МГОФ «Знание», 2023, 823 с.
4. Klymov, M.V., et al., Reliability of strain gauge measurements to clarify the strength of structures at high temperatures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 747(1).



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ КЕРАМИК И КОМПОЗИТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Гареев А. Р.<sup>1</sup>, Юрина А. Д.<sup>2</sup>, Уваров С. В.<sup>2</sup>, Наймарк О. Б.<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>НИИГрафит, д. 2, Электродная ул., Москва, 111524, Россия

<sup>2</sup>ИМСС УрО РАН, 1, Ак. Королева, Пермь, 614013, Россия, \*naimark@icmm.ru

Изучается деформационное поведение и разрушение керамических материалов и керамических композитов для идентификации структурных механизмов, определяющих состояние материалов и конструкций при динамических воздействиях и тепловом ударе. Совместно с ИЯФ СО РАН создан экспериментальный комплекс, включающий баллистическую установку и систему измерения скорости свободной поверхности нагружаемых мишеней (интерферометр PDV), проведены эксперименты по динамическому нагружению жаропрочной керамики. Экспериментальная программа реализована с перспективой разработки методик «in-situ» анализа стадийности поврежденности с использованием данных 3D рентгеновской томографии (ускоритель VEPP-3, в перспективе - синхротрон СКИФ). Исследования проведены с целью расширения диапазона скоростей деформирования, соответствующих переходной области скоростей деформирования в диапазоне  $10^5$ - $10^6$  с<sup>-1</sup>. С учетом особенностей регистрации массовой скорости свободной поверхности в условиях низкоскоростного воздействия разработаны специальные алгоритмы и программные комплексы по обработке данных, основанные на модифицированном методе вейвлет-анализа, Рис.1.

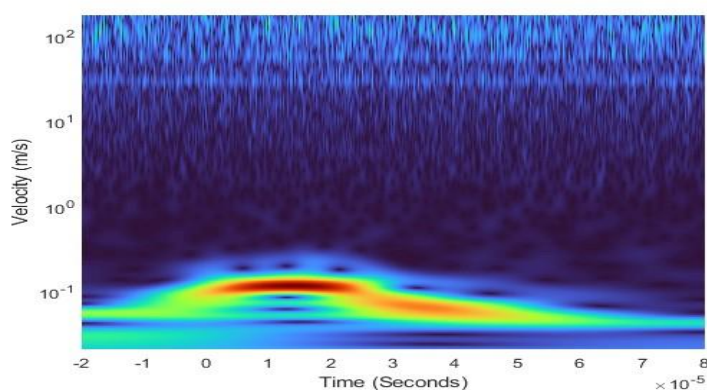


Рис. 1. Профиль скорости свободной поверхности

Обоснована модель динамического поведения в условиях теплового удара в рамках связанной постановки с учетом нелинейных зависимостей теплоемкости и теплопроводности от температуры. Определяющие соотношения верифицированы на основе данных динамических экспериментов, полученных на установке Гопкинсона-Кольского. Условия теплового удара заданы в виде граничного условия нелинейного закона изменения температуры (или теплового потока) на торце цилиндрического образца. Определены безразмерные комплексы и их численные значения, определяющие условия возникновения теплового удара при критических значениях параметров нарастания температуры (теплового потока).

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект №21-79-30041), <https://rscf.ru/en/project/21-79-30041/>.

## ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

Бурмашева Н. В.<sup>1,3</sup>, Просвиряков Е. Ю.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, ул. Комсомольская,  
г. Екатеринбург, 620049, Россия, [nat\\_burm@mail.ru](mailto:nat_burm@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, ул. Комсомольская,  
г. Екатеринбург, 620049, Россия, [evgen\\_pros@mail.ru](mailto:evgen_pros@mail.ru)

<sup>3</sup>Уральский федеральный университет, 19, ул. Мира. г. Екатеринбург, 620002, Россия

Для крупных промышленных установок и атмосферных процессов характерны теплообменные процессы с большими числами Релея. В виду того, что именно конвекция, возникающая вследствие неоднородного распределения тепла, играет важнейшую роль в процессе зарождения и поддержания движения в геофизических системах, изучению свойств течений вращающейся вязкой жидкости уделяется очень большое внимание. Отдельно при этом традиционно исследуется структура и жизненный цикл возникающих в данном процессе вихревых образований.

Моделирование течений вязкой жидкости в неоднородном тепловом поле с учетом вращения происходит на основе системы уравнений тепловой конвекции, в которую входят уравнение переноса импульса, калорическое уравнение и уравнение несжимаемости.

Учет крайнего сложного реального рельефа, влияющего на свойства течения жидкости, приводит к необходимости модификации существующих или разработки новых методов расчета. Но при этом необходимо четко понимать, насколько точны эти численные методы, насколько они адекватны реальности. Критерием здесь могут служить точные решения уравнений динамики вращающейся жидкости.

В докладе обсуждаются классы точных решений уравнений геофизической гидродинамики, описывающие неоднородные течения вязкой жидкости с учетом одного, двух и трех параметров Кориолиса в изотермическом и конвективном случаях.

Отдельное внимание уделяется построению условий совместности переопределенных систем, к которым редуцируется система уравнений рассматриваемой модели в случае сдвиговых течений.

### *Литература*

1. Н.В. Бурмашева, Е.Ю. Просвиряков. Труды Института математики и механики УрО РАН. 2020, Т. 26, № 2, 79–87.
2. Н.В. Бурмашева, Е.Ю. Просвиряков. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Математика». 2020, Т. 32, 33-48.
3. Н.В. Бурмашева, Е.Ю. Просвиряков. DReaM. 2020, Вып. 3, 29-46.

## ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СДВИГОВЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Бурмашева Н. В.<sup>1,3</sup>, Просвиряков Е. Ю.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, ул. Комсомольская,  
г. Екатеринбург, 620049, Россия, [nat\\_burm@mail.ru](mailto:nat_burm@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, ул. Комсомольская,  
г. Екатеринбург, 620049, Россия, [evgen\\_pros@mail.ru](mailto:evgen_pros@mail.ru)

<sup>3</sup>Уральский федеральный университет, 19, ул. Мира. г. Екатеринбург, 620002, Россия

Течения вязких жидкостей традиционно строятся на использовании уравнения Навье-Стокса. Одной из причин, индуцирующей конвективное течение в неизотермической жидкости является внешнее поле тяжести. Как правило, при моделировании процессов движения жидкости с учетом тепловых эффектов используется приближение Буссинеска. В этом случае, особенно при сравнительно небольших скоростях течения, эффекты сжимаемости можно считать пренебрежимо малыми, т. е. жидкость можно рассматривать как несжимаемую. Это означает, что скорость ее движения должна удовлетворять уравнению несжимаемости, полученному как следствие закона сохранения массы. Учет неоднородности распределения тепловых факторов осуществляется на основе уравнения теплопроводности, что усложняет получение точных решений уравнений рассматриваемой модели, поскольку увеличивается число дифференциальных связей между физическими параметрами модели.

Достаточно часто течение можно рассматривать как сдвиговое (или течение с поперечным сдвигом). Речь идет о течениях, величина скорости которых меняется в направлении, перпендикулярном направлению течения. К ним относятся течения в круглой трубе, плоском канале, пограничном слое на плоской пластине и другие важные для технических задач примеры.

Рассмотрение сдвиговых течений упрощает структуру вектора скорости (поскольку одну из его компонент в этом случае полагают нулевой), но при этом усложняется система уравнений рассматриваемой модели, она становится переопределенной.

Задача точного интегрирования уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнением несжимаемости и калорическим уравнением, сохраняет свою актуальность в связи с необходимостью разработки тестовых примеров, используемых для верификации и апробации численных экспериментов, широко используемых при проектировании и совершенствовании технических устройств.

В докладе приводится обзор классических точных решений и анонсируется класс точных решений для описания неоднородных конвективных сдвиговых течений различных типов: с учетом внешнего вращения, с учетом моментных напряжений, с учетом трения Релея и их комбинаций.

### Литература

1. Н.В. Бурмашева, Е.Ю. Просвиряков. Теоретические основы химической технологии. 2020, Т. 54, № 1, 114-124.
2. Н.В. Бурмашева, Е.Ю. Просвиряков. DReaM. 2020, Вып. 1, 6-23.
3. Н.В. Бурмашева, Е.Ю. Просвиряков. Ученые записки Казанского университета. Сер. Физико-математические науки. 2022, Т. 164, Кн. 4, 285-301.
4. S. Ershkov, N. Burmasheva, D. Leshchenko, E. Prosviryakov. Symmetry. 2023, Vol. 15, 1730.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ КОМПЛЕКС НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Москвичев В. В.<sup>1,2</sup>, Чернякова Н. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 53, пр. Мира, Красноярск, 660049, Россия, [fortuna@ict.nsc.ru](mailto:fortuna@ict.nsc.ru)

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, 79, пр. Свободный, Красноярск, 660041, Россия

Исследования низкотемпературной прочности материалов и конструкций, начиная с последней четверти XIX века базируются на экспериментальных результатах низкотемпературных испытаний гладких образцов и образцов с концентраторами напряжений при статическом и динамическом нагружениях, массовых испытаний на ударную вязкость, специальных крупногабаритных образцов и образцов с трещинами при статическом и циклическом нагружениях. Задача данных испытаний сводится к определению критериальных характеристик конструкционных материалов, способных оценить их сопротивление разрушению и обеспечивающих проведение расчетных оценок прочности при воздействии низких температур эксплуатации. Методы механических испытаний развивались во взаимосвязи с формированием критериальной основы, характеризующей деформационные процессы накопления повреждений, механизмы и кинетику разрушения. Это обеспечило развитие методических разработок расчетных методов механики деформирования и разрушения, формирование единого расчетно – экспериментального комплекса в системе «критерии – испытания – расчеты».

В работе выполнено обобщение результатов низкотемпературных испытаний малоуглеродистых, низколегированных и специальных сталей с определением температурных зависимостей характеристик механических свойств, ударной вязкости и вязкости разрушения. Температурные зависимости пределов текучести и разрушающих напряжений описаны степенными функциями, критических значений коэффициентов интенсивности напряжений – двухпараметрическими  $J$ -интеграла–четыре параметрическими функциями.

На этой основе развита методология расчетов элементов конструкций по критериям механики разрушения с учетом их зависимости от температуры эксплуатации с определением коэффициентов запаса по напряжениям, деформациям, характеристикам вязкости разрушения, числу циклов нагружения и критическим температурам хрупкости. Представлены результаты расчетов элементов конструкций с трещинами, эксплуатируемых при низких климатических температурах.

Предлагаемые подходы имеют значительную ретроспективу своего развития, однако, приобретают особую актуальность в связи с активным промышленным освоением и созданием машин, конструкций и сложных технических систем для условий арктических территорий.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Маликов А. Г., Завьялов А. П., Купер К. Э., Витошкин И. Е., Бегляров Е.,  
Миронова М. И., Карпов Е. В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук 630090, 4/1, ул. Институтская, г. Новосибирск, Россия,*  
[smalik707@yandex.ru](mailto:smalik707@yandex.ru)

В настоящее время в авиа- и ракетостроении находят широкое применение новые термически упрочняемые алюминий-литиевые сплавы 3-го поколения. Al-Li-сплавы 3-го поколения систем легирования Al-Cu-Li (В-1461, В-1469, 2195, 2196, 2198 и др.) и Al-Cu-Mg-Li (1441) имеют пониженную концентрацию Li ( $Li < 2 \text{ мас.}\%$ ). Данные сплавы считаются одними из наиболее перспективных для применения в аэрокосмической промышленности благодаря высоким механическим характеристикам: прочности, жесткости, пластичности, обрабатываемости и коррозионной стойкости. Высокие механические свойства этих сплавов обеспечиваются за счет специальной термомеханической обработки, в результате которой формируются различные фазы. Упрочняющими считаются фазы  $\delta'$  (Al<sub>3</sub>Li), T1 (Al<sub>2</sub>CuLi). С целью замены технологии заклепочного соединения и снижения тем самым веса получаемых конструкций, активно разрабатываются технологии лазерной сварки Al-Li сплавов. Проведены многочисленные исследования по изучению данного процесса. Направления исследований связаны с изучением структурно-фазового состава и механических свойств сварного шва без и с использованием различных типов проволоки, осцилляцией лазерного излучения и режимами воздействия.

На сегодняшний день структурно-фазовый анализ сварных соединений проводится с помощью классических методов: рентгенофазовый анализ, просвечивающая (ПЭМ) и сканирующая (РЕМ) электронная микроскопия. Данные методы требуют сложной, затратной по времени пробоподготовки образцов для исследований. Одним из основных недостатков традиционного метода дифрактометрии для данных исследований является использование геометрии «на отражение», при этом при различных углах дифракции пучок отражается от различных по площади поверхностей. При малых углах дифракции площадь максимальна (несколько мм по направлению пучка), а при больших углах дифракции площадь минимальна. Также в зависимости от угла дифракции меняется и глубина слоя вещества, с которой выходит дифрагированное излучение. Эти особенности не позволяют определять структурно-фазовое состояние всего трехмерного объема образца с характерными размерами 100 мкм, которое является определяющей характеристикой и непосредственно влияет на механические характеристики образца.

В настоящее время синхротронное излучение (СИ) позволяет по сравнению с традиционными методами практически полностью отказаться от пробоподготовки образцов. В отличие от электронной микроскопии, способной визуализировать лишь поверхность образцов или ламели нанометровой толщины преимуществом синхротронных методов является возможность работы с трёхмерной структурой объёмных образцов.

В работе проведены исследования влияние пост термической обработки на структурно-фазовое состояние лазерных сварных соединений алюминий-литиевых сплавов полученного с помощью волоконного лазера с использованием метода СИ, ПЭМ. Сочетание независимых методов диагностики позволит получить полный объем информации о структурном и фазовом составе сварного шва как в трёхмерном объеме, так и на атомарном уровне. Также проводилось исследование циклических (сопротивление усталости), динамических (трещиностойкость) и статических (предел текучести и временное сопротивление на разрыв) характеристик лазерных сварных соединений после термообработки.

*Благодарность Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00037, <https://rscf.ru/project/23-79-00037/>»*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ 45

Лапин М. В.<sup>1</sup>, Кузнецов А. М.<sup>1</sup>, Мушников А. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт машиноведения УрО РАН имени Э.С. Горкунова, д. 34,  
ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия. Matt2003@inbox.ru*

В машинах и конструкциях детали подвергаются различным видам нагрузок. При этом уровень напряжений на разных режимах может колебаться в широких пределах и приводить к возникновению в деталях как упругих, так и пластических деформаций. Это существенно затрудняет изучение сопротивления усталости, прогнозирование долговечности и определение остаточного ресурса, требует большого объема экспериментального материала и проведения натурных испытаний. Необходимо использование таких методов, которые не сводились бы только к накоплению экспериментальных данных, а позволяли приблизиться к пониманию физических основ явлений усталости. В этой связи перспективно применение неразрушающих методов контроля, в частности, магнитных методов [1].

Данная работа посвящена исследованию влияния упругого растяжения предварительно пластически деформированных растяжением на разную степень образцов стали 45 на их магнитные характеристики. Одной из задач исследования является проверка подхода [2] к оценке напряжений по положениям пиков дифференциальной магнитной проницаемости.

Для исследования были подготовлены цилиндрические образцы стали 45. В состоянии поставки предел пропорциональности исследованной стали равен 450 МПа. После пластического деформирования растяжением предел пропорциональности увеличивается. Испытания на упругое растяжение на каждом шаге пластической деформации проводили с шагом 1 кН от 0 и не превосходили предел пропорциональности. Магнитные измерения материала производили на каждом этапе нагружения непосредственно под действием нагрузки.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 12402060045-0. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

## *Литература*

1. Э. С. Горкунов, Р. А. Саврай. *Магнитные методы оценки упругой и пластической деформации при циклическом нагружении сталей*. 2015, вып.2, 6-15.
2. В. Г. Кулеев, М. В. Дегтярев. *О физической природе пиков дифференциальной магнитной проницаемости в пластически деформированных малоуглеродистых сталях // Физика металлов и металловедение*. 2019. Т. 120. № 2. С. 137–142.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Мушников А. Н.<sup>1</sup>, Поволоцкая А. М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия; mushnikov@imach.uran.ru*

<sup>2</sup>*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, 18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, 620108, Россия*

Решения задач магнитостатики широко применяются при проектировании и исследованиях в областях электротехники и машиностроения. Действие механических напряжений способно значительно изменять магнитные свойства ферромагнитных материалов, к которым относятся многие конструкционные стали. В то же время самому процессу намагничивания сопутствует магнитоэластическая деформация материала, что приводит к изменению напряженно-деформированного состояния объекта. При этом действующие напряжения влияют на величину магнитоэластической деформации. И хотя это влияние существенно, его редко учитывают при моделировании или ограничиваются одноосными конфигурациями, где напряжение одноосное и прикладывается в направлении, параллельном приложенному магнитному полю [1].

В настоящей работе рассмотрены различные подходы к математическому моделированию магнитоэластичности при изменении поля и одновременном действии механических напряжений. Проверка адекватности моделей проведена с использованием экспериментальных данных, ранее полученных авторами для различных ферромагнитных сталей [2-5].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 124020600045-0 и ИФМ УрО РАН по теме «Диагностика» № 122021000030-1.

## *Литература*

1. L. Daniel. *The European Physical Journal Applied Physics*. 2018, V. 83, 30904.
2. A.M. Povolotskaya, A.N. Mushnikov. *Russian Physics Journal*. 2024, V. 66, No. 11, P. 1226–1233.
3. A.M. Поволоцкая, А.Н. Мушников. *Дефектоскопия*. 2022. №11, С. 32–42.
4. A. Povolotskaya, S. Zadvorkin, E. Putilova, A. Mushnikov. *Key Engineering Materials*. 2022, V. 910, P. 988–993.
5. А.Н. Мушников, С.Ю. Митропольская. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2016, № 4, С. 57–70.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРЕ

Балданов А. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 40В, строение 1, ул. Ключевская, г. Улан-Удэ, 670013, Россия, aldarbalданov@gmail.com

Распространение многослойных композиционных материалов (КМ) в авиационных конструкциях требует учета присущих им специфических особенностей, в частности, образование межслойных дефектов при воздействии случайных ударов, которые могут оказывать серьезное влияние на остаточную прочность. Причины таких повреждений подробно описаны в работах [1, 2].

Повреждения в КМ при ударе зависят от энергии и направления удара, характеристик материалов, толщины и количества слоев КМ и др. Удары приводят к размягчению КМ, вмятинам, пробоинам, также внутренним расслоениям, которые незаметны при визуальном контроле, но при их дальнейшей эксплуатации могут привести к аварийным ситуациям, в частности, при сжимающих нагрузках снижение прочности может достигать 45% [3]. Возникает необходимость прогнозировать величины образуемых повреждений. Однако трудоемкость измерений размеров внутренних повреждений и разрушений КМ во время удара, большие деформации – все это создает сложности при проведении реальных экспериментальных работ. Поэтому остро возникает вопрос о разработке численных моделей деформирования и разрушения композиционных конструкций в условиях, приближенных к реальным.

В работе проведено численно-экспериментальное исследование поведения пластины из КМ при ударном нагружении с различными углами укладки слоев. Экспериментально определены скорости ударника до и после пробития многослойной пластины, размеры межслойных дефектов типа расслоений (табл. 1.). Для моделирования процесса разрушения пластин из КМ при ударном нагружении использовали программное обеспечение ANSYS, LS-DYNA в режиме двойной точности [4].

Выявлено, что в снижении энергии удара значительную роль оказывают размеры образуемых расслоений, которые зависят от угла укладки слоев и толщины пакета. Получена зависимость между площадью расслоения и остаточной скоростью ударника: чем больше площадь дефекта типа расслоение, тем больше снижение скорости ударника.

Таблица 1 – Результаты численного расчета размеров повреждений для различных вариантов укладки слоев 10-слойной пластины из КМ и остаточная скорость после удара

№ укладки	№1 [0] <sub>10</sub>	№2 [±45] <sub>5</sub>	№3 [0/90/±45] <sub>202</sub>	№4 [0/90] <sub>5</sub>
Общая площадь повреждения (мм <sup>2</sup> )	1732,9	1589,1	1546,7	1839,6
Остаточная скорость (м/с)	310	315	316	307

Работа выполнена в рамках гранта – Молодые ученые ВСГУТУ - 2024.

## Литература

1. Закономерности реализации случайных ударных воздействий на конструкцию крыла коммерческого самолёта / С. В. Дубинский, Ю. М. Фейгенбаум, А. А. Селихов, С. А. Гвоздев, В.М. Ордынцев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т.18. № 4-3. С. 604–611.
2. Ushakov A. et al. Probabilistic design of damage tolerant composite aircraft structures. – United States. Federal Aviation Administration. Office of Aviation Research, 2002. – №. DOT/FAA/AR-01/55.
3. Медведский А. Л., Мартиросов М. И., Хомченко А. В. Численный анализ поведения слоистой композитной панели с межслоевыми дефектами под действием динамических нагрузок // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 2. С. 127–134. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-127-134.
4. Моделирование оптимальной многослойной пластины из композиционных материалов для снижения скорости после удара / Л. А. Бохоева, В. Е. Рогов, А. Б. Балданов, Ю. Н. Иванов // Машиностроение и инженерное образование, 2022. № 3-4(70). С. 3-11.



# ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА МИКРОКАНАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Байметова Е. С.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова,  
7, Студенческая, г. Ижевск, 426069, Россия, baimetova.e.s@gmail.com*

Микроканальные теплообменные аппараты (ТА) типа «воздух-хладагент» или «теплоноситель-воздух» успешно используются в ряде отраслей промышленности, включая автомобильную и химическую обработку, а также внедрены в отрасли отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Такие устройства характеризуются наличием множества конструктивных вариантов исполнения, включающие собирающие и раздающие коллектора,



Рис. 1. Микроканальный ТА

соединённые множеством микроканальных оребренных трубок, объединенных в отдельные секции (Рисунок 1). Охлаждение на основе формирующихся микротечений происходит более эффективно, чем в каналах стандартной конфигурации. При этом часто возникает проблема неравномерного распределения жидкости по секциям в раздающем коллекторе. Поэтому одним из этапов проектирования микроканальных ТА является определение гидродинамической нагрузки на секции ТА (гидравлической развертки) с учетом сопротивлений в раздающем коллекторе. Для современных конструкций известные инженерные методики не применимы ввиду нестандартной конфигурации ТА [1, 2]. Поэтому оценка гидравлических характеристик возможна либо с помощью эксперимента, либо с помощью численного моделирования [3].

Комплексный подход, заключающийся в использовании математической гидравлической модели ТА, построенной на результатах численного моделирования гидродинамики ТА, верифицированных с помощью продувочных экспериментов на воде, представляется наиболее эффективным с точки зрения временных и экономических затрат. Данный подход был применен для получения гидравлической развертки раздающего коллектора в 11-ти секционном ТА изображенном на Рисунке 1. На Рисунке 2 показано распределение гидродинамической нагрузки на каждую секцию системы при различных числах Рейнольдса на входе в ТА. Происходит постепенное увеличение нагрузки на секции, максимум которой приходится на секции с 6 по 11.

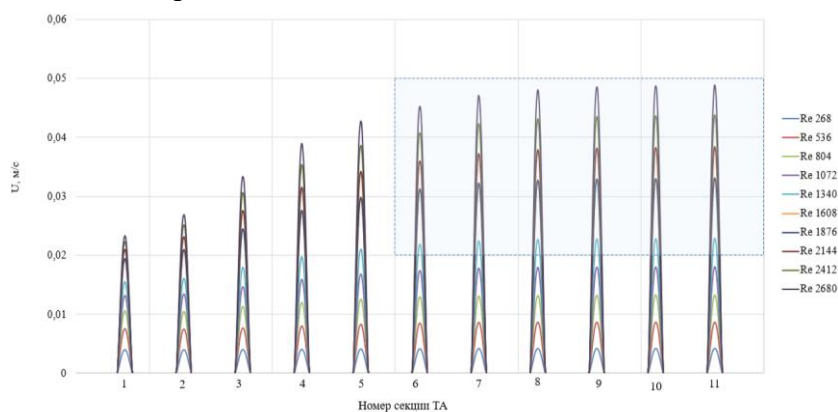


Рис. 2. Гидродинамическая нагрузка на секции ТА

## Литература

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.; Машиностроение, 1992. — 672 с.
2. Е.С. Байметова. Труды МАИ. 2023. № 130. DOI: 10.34759/trd-2023-130-08.
3. Е.С. Байметова, Е.А. Митрюкова. Труды Института системного программирования РАН, том 35, вып. 6, 2023, стр. 235-246. DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(6)-15.

# ВЛИЯНИЕ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ НА ТЕЧЕНИЯ МИКРОСТРУЙ

Королева М. Р.<sup>1</sup>, Митрюкова Е. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,

д.34, ул. Т. Барамзиной, г. Ижевск, 426067, Россия, [koroleva@udman.ru](mailto:koroleva@udman.ru)

<sup>2</sup>Ижевский Государственный Технический Университет имени Михаила Тимофеевича Калашикова, д.7, ул. Студенческая, г. Ижевск, 426069, Россия, [e.a.mitryukova@istu.ru](mailto:e.a.mitryukova@istu.ru)

Малоразмерные течения жидкости и газа представляют большой интерес благодаря перспективности их применения в различных технологиях, ориентированных на уменьшение массогабаритных параметров технических устройств и пониженное энергопотребление [1-2]. Благодаря этому микромасштабные внутренние течения жидкостей и газов являются предметом многих современных исследований.

Данная работа посвящена численному исследованию влияния конденсированной фазы на поток, формирующейся при истечении криптона из конического микросопла в область с низким давлением. Работа является продолжением исследований, проводимых ранее в [3], направленных на изучение течений инертных газов в микросоплах.

Схема расчетной области представлена на Рисунке 1. Характерные размеры области:  $R_{cr} = 250$  мкм, угол полураствора конуса  $4,3^\circ$ , длины конфузорной и диффузорной частей равны 5 и 7 мм, соответственно,  $L_{noz} = 12$  мм. Для получения корректного распределения параметров в сопле рассчитывалась также часть пространства за соплом. Радиус свободного объема за соплом составляет  $R_{ves} = 25$  мм, а длина  $L_{ves} = 20$  мм. Задача решалась в осесимметричной постановке. Расчетная область ограничена четырьмя видами границ: входная граница в сопло, непроницаемые стенки, ось симметрии и граница выхода в камеру с низким давлением. На входной границе задавались температура торможения  $T = 300$  К и давление торможения газа  $p_0$  равное 15 атм. В начальный момент времени газ считается неподвижным, по всей области интегрирования задаются параметры торможения.

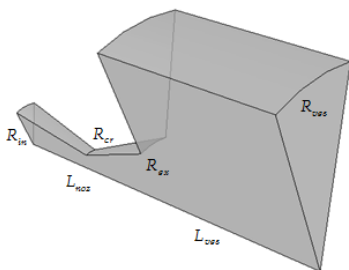


Рис. 1. Схема расчетной области

Математическое моделирование проводилось на основе численного решения полной системы уравнений Навье-Стокса, дополненной уравнением массовой доли конденсата и слагаемыми в уравнении сохранения энергии, отвечающими за теплоту фазового перехода. Подробная математическая модель данного процесса описана в работе [4].

Численное моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе методом установления были проведены расчеты без учета конденсированной фазы. На втором этапе исследования подключается модель формирования и роста конденсированных частиц. Данный этап также рассчитывается методом установления.

Фазово-химические превращения начинаются в диффузорной части сопла, близко к выходному сечению, где температура достигает температуры фазового перехода ксенона. В зоне появления конденсированных частиц запускается процесс тепловыделения, что приводит к повышению температуры потока и замедлению потока.

## Литература

1. О.А. Солнышкина, Э.С. Батыршин, Ю.А. Питюк, *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*, 2021, № 4, стр. 9-18.
2. М.А. Korepanov, М.Р. Koroleva, Е.А. Mitrukova, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2057, no. 1, 012016, 6 pp.
3. М.А. Korepanov, М.Р. Koroleva, Е.А. Mitrukova, А.Н. Nechay, *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2022, Vol. 18, no. 3, pp. 411-422. DOI:10.20537/nd220306
4. Е.А. Митрюкова. *Труды Института системного программирования РАН*. 2023. Т. 35. № 2. С. 225-234.

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ МАЛОЦИКЛОВОГО УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОПЫТНОГО СПЛАВА ТИТАНА

Каманцев И. С.<sup>1</sup>, Кузнецов А. В.<sup>1</sup>, Корелин А. В.<sup>2</sup>, Корелин И. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИМАШ УрО РАН

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

В современном мире постоянно происходит внедрение новых материалов. Эти материалы могут получены различными способами. В данной работе в качестве объекта исследования представлен материал из опытных сплавов титана на основе  $\beta$ -твердого раствора системы Ti–Nb–Zr. Для улучшения механических свойств образцов, по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием, за счет измельчения структуры до УМЗ состояния в работе были применены методы интенсивной пластической деформации. С другой стороны, выработка ресурса машин и конструкций, как правило, связана с накоплением повреждений механического и физико-химического происхождения в их деталях, узлах и элементах. Примером является наиболее распространенный при эксплуатации деталей машин и элементов конструкции вид разрушения – разрушения от усталости.

Для математического описания проведенного эксперимента основным уравнением является

$$\Delta L N^\gamma = C$$

где  $\Delta L$  представляет размах пластической деформации,  $\gamma = \frac{1}{\beta+1}$  – известный коэффициент Мэнсона-Коффина,  $N$  – число циклов до разрушения,  $C$  – нормирующий коэффициент.

Испытания проводились на испытательной машине УТС 111.2-100-52. В условиях мягкого нагружения, то есть с постоянным контролем удержания прикладываемого усилия. Нагружение осуществлялось по схеме «Растяжение-Растяжение». Образцы были выполнены в виде цилиндров с резьбовой захватной частью. В машинных диаграммах осуществлялась полная фиксации данных в осях «Нагрузка – Перемещение».

Коэффициент  $\beta$  вычислялся при помощи поиска решений в пакете EXCEL из условий максимальной близости разности уравнения к нулю, когда обе части равенства были перенесены влево.

Сопоставляя полученные результаты с кривой Велера, основанной на первых четырех экспериментальных точках, аппроксимированных на условиях прохождения кривой через все точки. Проводя анализ полученной картины, можно сказать, что точки хорошо ложатся на экспериментальную кривую, а значит можно говорить о достоверности полученных результатов (рис.1).

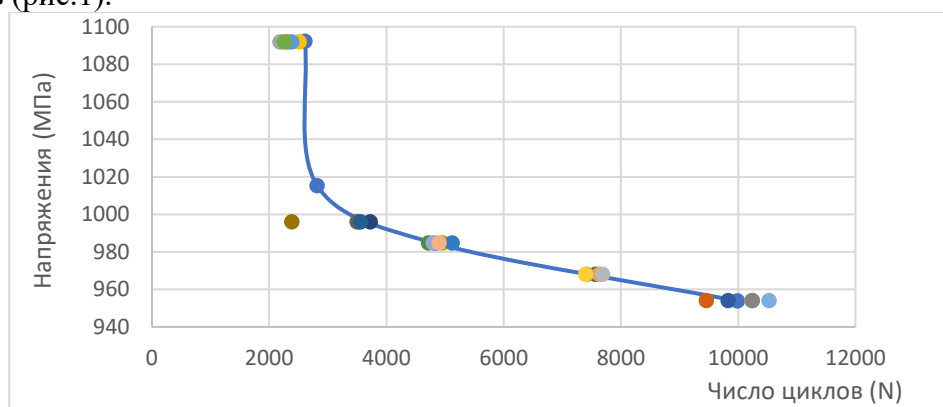


Рис. 2. Отклонение экспериментальных данных от математической модели для серий экспериментов в условных точках 2200, 3600, 5000, 7500 и 10000 циклов соответственно.

## Литература

1. Колмогоров Л.В., Мигачев Б.А., Бурдуковский В.Г. Феноменологическая модель накопления поврежденности и разрушения при различных условиях нагружения. Полиграфист, Екатеринбург, 1994, 108.

# ВНЕШНЯЯ АЭРОДИНАМИКА МНОГОСЕКЦИОННОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Мищенко О. В., Шигапова А. Р., Чернова А. А.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
7, Студенческая, г. Ижевск, 426069, Россия, alicaaa@gmail.com*

Распространение гидравлического оборудования в различных отраслях промышленности и производства приводит к необходимости проектирования и оптимизации специализированных конвективных теплообменных аппаратов – устройств для отвода избыточного тепла от гидравлических масел. Такие устройства [1,2] должны обладать как компактностью, так и высокой тепловой эффективностью. Поэтому одним из наиболее распространенных решений [2] в настоящее время является применение в виде маслоохладителя конвективного теплообменного аппарата, представляющего собой многосекционный сложный коллектор с развитой внешней поверхностью (рис.1). Несмотря на наличие отдельных работ [1-5], связанных с численным моделированием рабочих процессов, в целом, конструкция остается не отработанной, а процессы внешней аэродинамики и сопряженного теплообмена – недостаточно изученными. Данная работа посвящена вопросам численного исследования особенностей внешней аэродинамики секций многосекционного конвективного теплообменного аппарата с целью подбора оптимального по тепловой эффективности



Рис. 1. Многосекционный конвективный теплообменный аппарат

расстояния между планками устройства с одной стороны, и с целью определения необходимых и достаточных упрощений геометрической модели, с другой. Рассматривается сопряженная задача теплообмена между нагретым гидравлическим маслом, пластинами маслоохладителя и холодным потоком нагнетаемого вентилятором воздуха. Исследуется течение теплопроводной несжимаемой жидкости (условного гидравлического масла с молярной массой 48,61кг/моль, плотностью 1100кг/м<sup>3</sup>, динамическим коэффициентом вязкости 0.11Па\*с и коэффициентом теплопроводности 0,41Вт/(м\*К)) в каналах малого размера [3] с теплоотдачей в стенку алюминиевой планки маслоохладителя [3,4] и турбулентное ( $20000 < Re < 400000$ ) пространственное течение воздуха в зазоре между планками маслоохладителя. Пространственная задача сопряженного теплообмена решалась методом контрольных объемов с использованием свободно распространяемого ПО – openFoam. Разностная сетка состоит из 8,5млн. шестигранных элементов. В результате расчетов были получены распределения полей давлений, скоростей, температур, а также плотностей тепловых потоков. Показано, что локальные особенности конструкции планок конвективных многосекционных теплообменных аппаратов обуславливают формирование вихревых структур в области за секцией, а также и анализ полученных теплофизических характеристик, в том числе полученных температурных профилей, позволил выявить оптимальную, с точки зрения тепловой эффективности маслоохладителя, величину зазора между планками маслоохладителя. Показана возможность и корректность расчета конструкции на 1 секции, состоящей из 2 планок, с дополнением условиями симметрии.

## Литература

1. E.S. Baymetova, A.A. Chernova, M.R. Koroleva, M. Kelemen Optimization of the developed outer surface of an industrial oil cooler // *MM Science Journal*. 2021. Т. 2021. № June. С. 4764-4768.
2. Е.С. Байметова. Труды МАИ. 2023. № 130. DOI: 10.34759/trd-2023-130-08.
3. Цыганков М. П., Кручинин Д. С. Особенности математического моделирования высокотемпературных теплообменников. *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2013. Т. 56. В.3, с. 95–99.
4. Жунов А. А., Шевелев Д. В., Ананьев П. А. Моделирование потерь давления воздуха в обрешеченном трубном пучке воздушного конденсатора. *Наука и образование*. 2013. № 03. DOI: 10.7463/0313.0544307.
5. Е.С. Байметова, Е.А. Митрюкова. Труды Института системного программирования РАН, том 35, вып. 6, 2023, стр. 235-246. DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(6)-15.

# ОСТЕОИНТЕГРАЦИЯ КАК БИОПОДОБНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ КОСТНОИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТРАВМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ

Кузнецов В. П.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
19, Мира, Екатеринбург, 620003*

Тканеинженерные костные конструкции при остеointegrации представляют собой биосовместимые имплантаты с регенерируемыми на их поверхности остеобластными клетками и предназначены для восстановления функции утраченных конечностей. Основными направлениями развития остеointegrационного протезирования являются сокращение сроков приживаемости имплантатов в костном канале и снижение влияния бактериальных воздействий на кожные и мышечные ткани. Перспективы развития остеointegrационного протезирования состоят в реализации природоподобных технологий. В частности, на основе создания конструкций имплантатов типа Press-Fit появилась возможность регенерации клеток из аутологичного материала, срезаемого в виде костных стружек режущими элементами (золотой стандарт). Разработанные конструкции вкручиваемых и типа Press-Fit имплантатов позволяют через систему отверстий доставлять стимулирующие регенерацию клеток лекарственные средства типа ВМР на интерфейс кость-имплантат. Особое значение при реализации биоподобной технологии остеointegrации имеет обеспечение соразмерности клеток костной ткани и структурных компонентов (зерен) материала имплантатов. Разработаны и изготовлены имплантаты из ультрамелкозернистых и наноструктурированных сплавов системы Ti-Nb-Zr и Ti Grade 4.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета «Приоритет-2030».

## *Литература*

1. Kuznetsov V.P., Emanov A.A., Gorbach E.H., Gorgots V.G. *Implants for one-stage osteointegration with mechanobiological stimulation of bone formation // Materials. Technologies. Design. 2021. Vol. 3, No. 3(5). P. 23–30.*
2. Кузнецов В.П., Еманов А.А., Горгоц В.Г. *Имплантаты для одноэтапной остеointegrации с механобиологическим стимулированием костеобразования // Информационные технологии в медицине и фармакологии. Сборник научных трудов по итогам VIII международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 11 августа 2021 г.). – НН : ИЦРОН. 2021. – с. 28.*
3. Varsegova T.N., Emanov A.A., Kuznetsov V.P., Ovchinnikov E.N. *The Morphological and Morphometric Study of the Sciatic Nerve after Amputation and Prosthetics of the Leg Experimentally Using an Original Implant // Medical News of North Caucasus. 2023. Vol. 18, Iss. 1. P. 50–54.*
4. Стогов М.В., Еманов А.А., Кузнецов В.П., Горбач Е.Н., Киреева Е.А., Корелин А.В. *Сравнительная оценка остеointegrации новых чрескожных имплантатов из ультрамелкозернистого сплава Ti Grade 4 // Гений ортопедии. – 2023. – 29 (5). – 526–534.*

# ИНТРАОПЕРАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ВОЗВРАТНОГО ГОРТАННОГО ВО ВРЕМЯ ТИРЕОИДЭКТОМИИ

Миронов В. А.<sup>1,2</sup>, Гагиев В. В.<sup>2</sup>, Белов С. С.<sup>2</sup>, Привалова В. В.<sup>3</sup>, Цаплина П. К.<sup>3</sup>,  
Гилева В. А.<sup>1</sup>, Жаксыбаева Э. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» МЗ РФ

<sup>2</sup> 5 военный клинический госпиталь войск национальной гвардии Российской Федерации;

<sup>3</sup> Российская академия наук Институт машиноведения им. Э. С. Горкунова

Актуальность: Изучен неинвазивный метод интраоперационного мониторинга показателей variability сердечного ритма (ВСР) при тиреоидэктомии (ТЭ)[1].

Цель исследования: оценка применения анализа ВСР для предупреждения повреждения возвратного гортанного нерва (ВГН) у больных с узловыми образованиями щитовидной железы (УОЩЖ) при ТЭ.

Задачами являются анализ ВСР при оперативном вмешательстве и установление взаимосвязи данных ритмокардиографии при контакте с ВГН. При ТЭ выявлены признаки повышения вагусного влияния на ритм (см. таб.1 и рис.1).

Таблица 1 – Значения показателей ВСР в покое и пробах вегетативной реактивности до операции и во время ТЭ

Показатели	Парасимпатические волны σs; HF%	Симпатическая волны σm; LF%	Гуморально-метаболические волны σl; VLF%
σ – с среднеквадратическое отклонение	0,008±0,005; 0,003±0,001; z <sup>1</sup> =2,36	0,003±0,002; 0,003±0,001; z <sup>1</sup> =0,43	0,009±0,004; 0,008±0,007; z <sup>1</sup> =0,44
F% – спектральная доля	44,24±37,93; 11,23±5,13; z <sup>1</sup> =2,23	6,25±5,84; 13,73±11,50; z <sup>1</sup> =1,37	49,50±30,45; 75,03±15,19; z <sup>1</sup> =1,84
ARA – с амплитуда дыхательной аритмии	0,018 ±0,011; 0,007±0,003; z <sup>1</sup> =2,43		



Рис. 1. Ритмокардиограмма в реальном времени во время оперативного вмешательства, работа хирурга вблизи возвратного гортанного нерва повлияла на variability ритма в виде эпизода (розового цвета) урежения ритма сердца в ответ на воздействие. Чувствительность съема электрокардиосигналов до 1000±3Гц.

Во время гемитиреоидэктомии при приближении к области иннервации ВГН зарегистрирован эпизод брадикардии с высокочастотными волнами, отражающими повышение парасимпатического влияния на ритм. После смены тактики эпизод прекратился (см. Рис.1).

На всех ритмокардиограммах регистрировались изменения ТЭ. Таким образом, можно графически в реальном времени контролировать ход оперативного вмешательства у больных с УОЩЖ во время тиреоидэктомии.

Выводы: Зарегистрированы данные РКГ во время контакта с возвратной ветвью блуждающего нерва. Контакт с нервом провоцировал урежение сердечного ритма, что стимулировало парасимпатическую систему, которая отвечает за урежение ЧСС. Методика позволяет неинвазивно снизить риск интраоперационных осложнений.

### Литература

1. *Hermann, M. Neuromonitoring in thyroid surgery: prospective evaluation of intraoperative electrophysiological responses for the prediction of recurrent laryngeal nerve injury // M.Hermann, C. Hellebart, M. Freissmuth /Ann Surg2004;240:9-17.*

# ДООПЕРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА РАКА ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Миронов В. А.<sup>1,2</sup>, Акимова А. В.<sup>1,2</sup>, Гагиев В. В.<sup>2</sup>, Белов С. С.<sup>2</sup>, Привалова В. В.<sup>3</sup>,  
Цаплина П. К.<sup>3</sup>, Гилева В. А.<sup>1</sup>, Жаксыбаева Э. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» МЗ РФ

<sup>2</sup> 5 военный клинический госпиталь войск национальной гвардии Российской Федерации

<sup>3</sup> Российская академия наук Уральское отделение Институт машиноведения  
имени Э. С. Горкунова

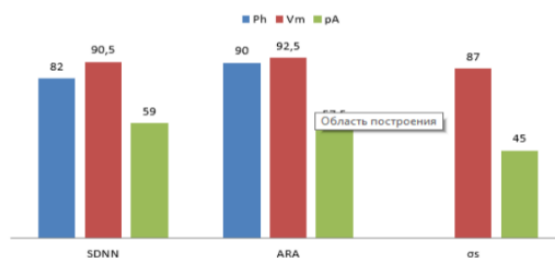
Авторами изучена и предлагается к использованию возможность анализа состояния вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы путем анализа variability сердечного ритма (ВСР), который позволяет до операции диагностировать папиллярный рак щитовидной железы (ПРЦЖ) [1].

Физиологической основой применения ритмокардиографии является оценка вегетативной симпатической, парасимпатической регуляции сердечного ритма и влияния на нее гуморально-метаболической среды, с применением аппаратно-программного комплекса КАП-РК-01-Микор с разрешением  $1000 \pm 3$  Гц. Метод осуществляется графическим построением ритмокардиограммы (РКГ), ее анализом и обработкой на основе временного и спектрального анализа волновой ВСР. Одновременно вместе с РКГ в реальном текущем времени идет регистрация электрокардиограммы (ЭКГ) Обследование проводится в покое и с применением стимулирующих вегетативных нагрузочных проб [2].

Наибольшие значимые показатели ВСР зарегистрированы при гуморально-метаболической стимуляции в пробе Ашнера у пациентов с подтвержденным гистологически операционным материалом (Таб.1)

Таблица 1 – Отличия показателей ВСР в вегетативных нагрузочных пробах у пациентов с раком щитовидной железы (n=13) по сравнению с пациентами с узловыми образованиями щитовидной железы (n=20)

Показатель	Фоновая проба (Ph)	Проба Вальсальвы (Vm)	Проба Ашнера (pA)
SDNN	U=82, Z=2.308173, p=0.020990	U=90.5, Z=2.041241, p=0.041228	U=59, Z=2.936208, p=0.003323
ARA	U=90, Z=2.056943, p=0.039692	U=92.5, Z=1.978434, p=0.047881	U=57.5, Z=2.984874, p=0.002837
os		U=87, Z=2.151154, p=0.031465	U=45, Z=3.39028, p=0.000698



Наибольшие значимые показатели ВСР зарегистрированы гуморально-метаболической стимуляции в пробе Ашнера у пациентов с подтвержденным гистологически операционным материалом. При визуальном анализе видны достоверно отличающиеся показатели ВСР в пробе Ашнера. Ретроспективно сопоставили данные РКГ и интраоперационный подтвержденный гистологически материал ПРЦЖ. Выявлена корреляция между показателями ВСР и биопсией (чувствительность 86,6% и специфичность 90,9%).

Таким образом, выявлены особенности вегетативной дисрегуляции у больных узловыми образованиями щитовидной железы, с помощью которых представляется возможность дооперационной диагностики предполагаемого рака щитовидно железы с возможностью планирования объема предстоящего оперативного вмешательства.

## Литература

1. *The Thyroid Cancer Epidemic, Perspective // Benjamin R Roman 1, Luc G Morris, Louise Davies / Curr Opin Endocrinol Diabetes Obes. 2017 Oct;24(5):332-336.*
2. *Свидетельство РосАПО об официальной регистрации программы для ЭВМ № 950230 от 06.07.1995 г. В.А. Миронов, Т.Ф. Миронова. «Пакет прикладных программ построения и анализа ритмокардиограмм «Микор».*

## ГРАДИЕНТНЫЙ КОМПОЗИТ Ti/TiN

Бурхинова Н. Ю.<sup>1</sup>, Филиппов А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 4/1, Институтская, Новосибирск, 630090, Россия, [nomina.burkhnova@mail.ru](mailto:nomina.burkhnova@mail.ru), [filippov@itam.nsc.ru](mailto:filippov@itam.nsc.ru)

Титаноматричные композиты с добавлением нанодисперсного нитрида титана обладают высокими твердостью, модулем упругости, коррозионной и износостойкостью, а также способен сопротивляться воздействию высоких температур, благодаря чему широко используется в авиационной и космической промышленности [1]. Ожидается, что использование градиентных материалов, которые сочетают в себе свойства пластичности и твердости, за счет постепенного изменения состава слоев, должны удовлетворять требованиям к производительности изделий, используемых в данных сферах [2]. Так, в настоящей работе показано изменение механических свойств и структуры титаноматричного композита в зависимости от слоев, содержащих различное количество нитрида титана.

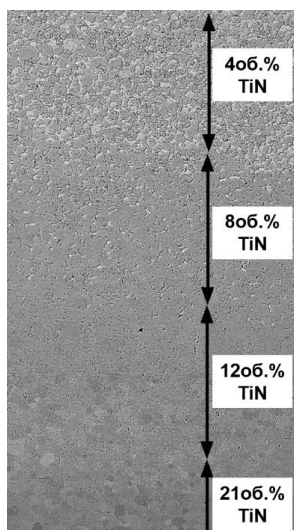


Рис. 1. Микроструктура спеченного композита Ti-TiN

Композит системы Ti-TiN с градиентом по составу и структуре в зависимости от объемного содержания нитрида титана был изготовлен методом горячего прессования при температуре 1300°C при давлении 30 МПа. На рис. 1 представлена микроструктура композита, полученного с помощью СЭМ. Границы между слоями прочно соединены между собой и плавно переходят из одной области в другую. Структура слоя, содержащего 4 об.% TiN, состоит из пластинчатой матрицы  $\alpha+\beta$ -Ti и зерен, содержащих твердые фазы  $\alpha$ -Ti и различных нитридов титана. При 8 об.% TiN пластичной фазы становится меньше в результате стабилизации азотом  $\alpha$ -Ti и TiN. Увеличение концентрации нитрида титана приводит к росту зерен, содержащих твердые фазы. Таким образом, микроструктура полученного материала представляет постепенно увеличивающиеся зерна, содержащие твердые фазы  $\alpha$ -Ti и нитридов титана.

Методом инструментального индентирования были определены твердость и модуль упругости композита Ti-TiN, результаты представлены на рис. 2.

Твердость и модуль упругости постепенно вырастают с увеличением содержания нитрида титана. Средние значения твердости и модуля Юнга для слоя, содержащего 4 об.% TiN, составили 3,7 ГПа и 106,8 ГПа, соответственно, для 8 об.% TiN – 5,6 ГПа и 133 ГПа, 12 об.% TiN – 6,7 ГПа и 147 ГПа, 21 об.% TiN – 7,7 ГПа и 165,3 ГПа.

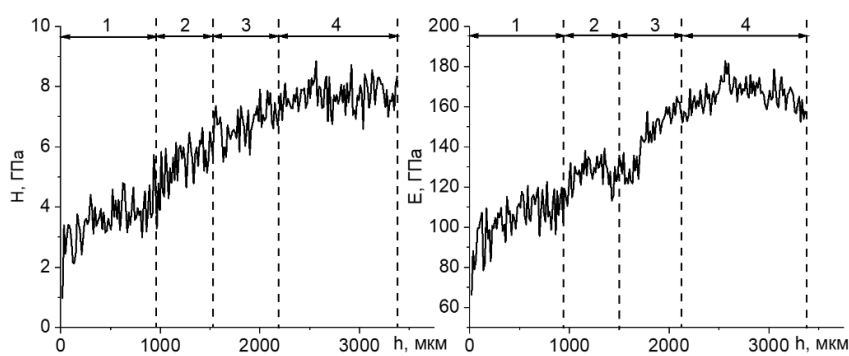


Рис. 2. Твердость и модуль Юнга композита Ti-TiN, где 1 – 4 об.% TiN, 2 – 8 об.% TiN, 3 – 12 об.% TiN, 4 – 21 об.% TiN

Таким образом, полученный материал представляет собой менее твердую область, плавно переходящую в участок, обладающий высокой твердостью и модулем упругости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00353) с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

### Литература

1. Falodun O.E., Obadele B.A. Titanium-based matrix composites reinforced with particulate, microstructure, and mechanical properties using spark plasma sintering technique: a review. 2019. vol. 102. 1689-1701.
2. Udupa G., Rao S.S. Functionally graded composite materials: an overview. 2014. vol. 5. 1291-1299.



# СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Кочанов А. Н.

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН,  
4, Крюковский тупик, Москва, 111020, Россия, kochanov@mail.ru*

Процесс разрушения материалов как эволюция трещин на разных масштабных уровнях во многом определяется их структурой, которая характеризуется формой и размером зерен, пористостью, наличием микродефектов, и наряду с химическим составом определяет их физические свойства, в том числе и прочностные. Полиминеральный состав, наличие микродефектов и остаточных локальных напряжений позволяют квалифицировать горные породы как структурно неоднородные материалы, что обуславливает особенности процессов их деформирования и разрушения. Для оценки свойств отдельных минералов горных пород и их структурной неоднородности использовался метод микро и наноиндентирования [1]. В качестве примера в таблице 1 приведены результаты исследований данным методом упругих и прочностных свойств порообразующих минералов гранита. Из таблицы следует, что существует значительное различие между минералами по физическим свойствам, что обуславливает возникновение концентрации напряжений, приводящее к зарождению и распространению микротрещин, даже если их значения ниже прочности горной породы. По результатам экспериментов по взрывному воздействию на образцы различных горных пород установлено, что зерна кварца несмотря на значительную прочность на сжатие и твердость отличаются повышенной склонностью к образованию микротрещин, что обусловлено, очевидно, его низкими значениями вязкости разрушения. Для оценки развития микротрещин использовались методы оптической, электронной микроскопии, рентгеновской компьютерной томографии, ультразвукового контроля [2].

Наряду с изучением микротрещин рассматривалось также при взрывном воздействии развитие радиальных трещин [3]. В граните, на основании полученных изображений, наблюдается неравномерное, скачкообразное развитие макротрещин что, очевидно, вызвано наличием границ зерен минералов с различными прочностными и упругими свойствами. Задержка в развитие магистральной трещины обуславливает достаточно низкую скорость ее распространения. Это позволяет образоваться более мелким трещинам, что приводит к множественному трещинообразованию. В известняке, как однородной породе практически состоящей из карбонатов, не наблюдалось множественного трещинообразования, а имело место образование и развитие отдельных «лучевых» прямых трещин большей протяженности, которые визуально наблюдались на поверхности образцов и достигали их границ. Результаты экспериментов могут быть полезными при описании процессов деформирования и разрушения структурно неоднородных материалов.

Таблица 1 – Свойства порообразующих минералов гранита

Минералы	Свойства		
	Твердость, ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Вязкость разрушения, МПа $\times$ м <sup>1/2</sup>
Кварц	12	100	0,5
Полевые шпаты	7	60	0,8

## Литература

1. Ю.И. Головин, А.И. Тюрин, С.Д. Викторов, и др. *Изв.РАН. Сер. физ.* 2018. Т.82. №7. С. 947-950.
2. С. Д. Викторов, А.Н. Кочанов, А.А. Пачежерцев. *Изв.РАН. Сер. физ.* 2018. Т.82. №7. С. 878-880
3. A.N. Kochanov. *Reviews on Advanced Materials and Technologies.* 2023. T.5 N 3. pp 39-46

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СТРУКТУР, ОСНОВАННЫХ НА ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Варыгина М. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 53, пр-т Мира, г. Красноярск, 660049, Россия, vmp@ict.nsc.ru

Достижения в развитии технологий аддитивного производства позволяют проектировать и изготавливать сложные пористые структуры с контролируемой геометрией и заданными механическими свойствами на макро-, мезо- и микромасштабах. Среди них выделяют материалы и конструкции на основе трижды периодических минимальных поверхностей, характеризующихся регулярно повторяющимися элементарными ячейками, представляющими собой поверхности с нулевой средней кривизной [1]. Благодаря таким свойствам, как высокая пористость, легкий вес, гибкость, высокая прочность и исключительная способность поглощать энергию, различные топологии таких структур находят все более широкое применение во многих отраслях промышленности для механического демпфирования, контроля вибрации, звукоизоляции, улучшения тепловых характеристик каналов охлаждения [2-3].

Сложность численного анализа отклика структур, основанных на трижды-периодических минимальных поверхностях, на физическое и механическое воздействия обусловлена большой размерностью моделей, связанной с тонкой дискретизацией геометрической модели, необходимой для адекватного представления сложной структуры. Обычно создание первоначальной фасетной геометрии выполняется с помощью алгоритма триангуляции Делоне [4], который может приводить к образованию множества треугольных граней с неправильными соотношениями сторон на сетке сильно изогнутых минимальных поверхностей. Для получения качественной расчетной сетки требуется регуляризация фасетной геометрии. Этапы построения конечно-элементных моделей представлены на рисунке 1 на примере структуры Шоэна IWP.

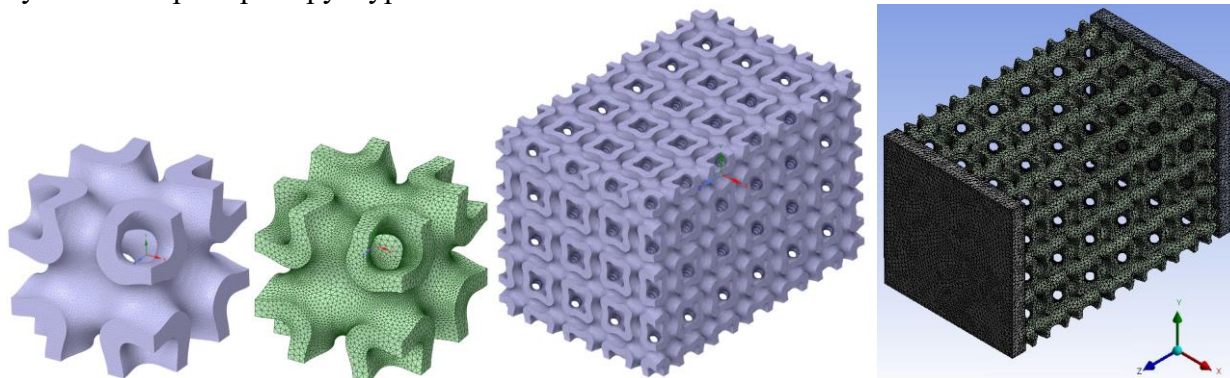


Рис. 1. Этапы построения структуры Шоэна IWP (слева направо): создание элементарной ячейки, регуляризация фасетной геометрии, создание структуры из элементарных ячеек, построение конечно-элементной сетки

В работе представлены результаты численного моделирования механического поведения различных структур под действием сжимающей нагрузки. Обсуждается влияние формы и параметров структур на напряженно-деформированное состояние.

## Литература

1. A.H. Schoen *Infinite Periodic Minimal Surfaces without Self-Intersections*; NASA: Washington, DC, USA, 1970, 92 p.
2. А.В. Еремин, С.А. Зинина, О.О. Джонсон. *Вестник Югорского государственного университета*. 2023, Т. 68, Вып. 1, 60-66.
3. K. Yeranev, Yu Rao. *Energies*. 2022, V. 15, 8994.
4. A. Jones, M. Leary, S. Bateman, M. Easton. *Software Impacts*. 2021. V. 10, 100167.

## ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ РАЗРУШЕНИЮ

Соколовская Э. А., Кудря А. В., Сергеев М. И., Алексеев В. И., Буданова Е. С.

НИТУ МИСИС, стр.1, 4, Ленинский проспект, Москва, 119049, РФ,  
AVKudrya@misis.ru

Материал - это среда со структурой, степень неоднородности морфологии которой достаточно велика (даже в рамках штатной технологии их получения), отсюда известные сложности при оценке сопротивления разрушения [1,2]. Решение задачи, связанной с получением объективной оценки сопротивления таких материалов разрушению в принципе достижимо, но для этого требуется применение метрологически обеспеченных цифровых процедур измерения неоднородности морфологии разнородных структур и разрушения.

Диапазон масштабов структур, встречающихся в конструкционных материалах чрезвычайно широк [1]. Их происхождение – результат эволюции структур и дефектов в ходе часто достаточно длинного в производстве материалов технологического процесса. Первые различия по составу появляются в виде неоднородности дендритного рисунка. Она нередко наследуется прокатом - в виде полосчатой структуры, вытянутой вдоль оси прокатки с переменным содержанием легирующих элементов и примесей. Объемная доля неметаллических включений, диапазон размеров, их размещение в объеме металла играет важную роль в разрушении. Существенную роль играют размер зерна и наличие на них зернограницных сегрегаций примесей Sb, P, Sn, As. Уровень вязкости также определяет микроструктура, в сталях, являющаяся результатом превращения высокотемпературной фазы (аустенита) при охлаждении.

Для оценки механизмов разрушения разномасштабных структур необходимо измерение их геометрии в пределах образца (или изделия), далее их разрушения: изломов в тех же масштабах (*post mortem*) или акустической эмиссии - АЭ (*in situ*). Вплоть до недавнего времени такие измерения были недоступны из-за их трудоемкости. Цифровые средства позволили обеспечить прямой ввод информации в цифровой форме в компьютер и обработку в «реальном времени» измерений рельефа изломов, структур в массовых масштабах. Это позволило, в частности, оценить статистическую природу исследуемых объектов и учесть её при описании различий в морфологии структур и изломов. Поскольку неоднородность структур нередко затрудняет оценку хладноломкости был предложена техника её определения на малом объеме экспериментального материала (~ 2,0 мм<sup>2</sup>) по измерениям АЭ, когда скачкообразное увеличение эмиссии при сходных размерах трещины будет означать переход от вязкого разрушения к хрупкому. Этим была обеспечена привязка каждого испытания к отдельным фрагментам структуры и механизмам их разрушения.

Возможности цифровизации АЭ и фрактографии оказались также полезными при совершенствовании методов определения критериев нелинейной механики разрушения: энергетического – интеграла Черепанова-Райса (*J*-интеграла) и деформационного – критического раскрытия трещины  $\delta_c$ . Это позволило оценить геометрию растущей вязкой трещины при испытании и выделить критические стадии в развитии трещины и получить в итоге уточненные значения трещиностойкости с привязкой к скачкам трещины.

В целом, результаты работы показывают, что на основе цифровых измерений структур, АЭ при разрушении и морфологии изломов средствами разномасштабной фрактографии, с привязкой к структуре, возможны объективные оценки сопротивления разрушению сред с неоднородной структурой, прогноз риска преждевременного разрушения и возможность конструирования оптимальных структур под заданные свойства.

### Литература

1. *Сталь на рубеже столетий / Под общ. ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСис, 2001. 664 с.*
2. A. V. Kudrya, E. A. Sokolovskaya., *Physics of Metals and Metallography*, 2022, 123 (12), pp. 1253 – 1264.

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МАГНИТОСТРИКЦИИ ДЛЯ СТ3 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТЕРМООБРАБОТКИ

Проботюк В. В.<sup>1</sup>, Зверьков Н. Д.<sup>1</sup>, Кулак С. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, 38, улица Володарского, г. Тюмень, 625000, Россия, [probotjukvv@tyuiu.ru](mailto:probotjukvv@tyuiu.ru)

В работе [1] была описана установка для измерения магнитострикции различных сталей. В работах [2,3] указывается возможность корреляционной зависимости между сигналом акустической эмиссии (АЭ), а также магнитоакустической эмиссии (МАЭ) с магнитострикцией сталей. Установление и проверка этой корреляционной зависимости и стало целью данной работы.

Для этого были изготовлены образцы из стали 3 460×70×4 мм. В их перечень входит: Ст3 (закалка), Ст3 (поставка), Ст3 полученные после отпуска при температурах 650 °С, 350 °С, 500 °С соответственно. Затем были построены кривые зависимости магнитострикции этих образцов от напряженности магнитного поля. Данные зависимости представлены на рис 1.а. После этого на этой же катушке, создавалось переменное магнитное поле с частотой 9 Гц такое что скачки Баргаузена были максимальны. Сигнал МАЭ получали при помощи станции АЭ Uniscopre.

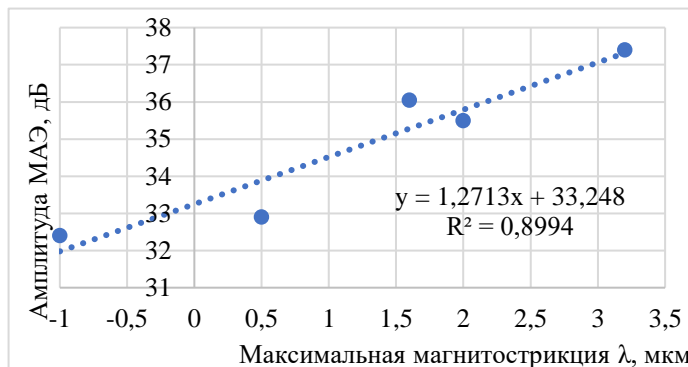
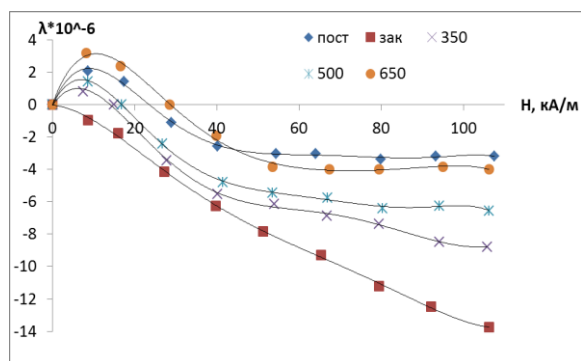


Рис. 1. а) Зависимости магнитострикции от напряженности магнитного поля для сталей марки Ст3 при различных режимах термообработки

б) Корреляционная зависимость амплитуды МАЭ от магнитострикции для сталей Ст3 при различных режимах термообработки

Как видно из Рис 1.б приведенной зависимости между параметром магнитоакустической эмиссии – амплитудой МАЭ и магнитострикцией наблюдается корреляция с достаточно высоким значением коэффициента аппроксимации ( $R^2 = 0,8994$ ) при линейной аппроксимации. Наибольшая погрешность приходится на значение для Ст3 при отпуске 500 °С

## Литература

1. Особенности магнитострикции в углеродистых сталях / В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов, С. М. Кулак [и др.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2021. – № 5. – С. 6-14.
2. Амплитудно-частотные характеристики магнитоакустической эмиссии термообработанных сплавов железа / В. Н. Костин, М. А. Гурьев, О. Н. Василенко [и др.] // *Физическая мезомеханика*. – 2013. – Т. 16, № 5. – С. 103-110
3. Хамитов В.А., Бартенов О.А. Применение акустической эмиссии для оценки магнитострикции // *Заводская лаборатория*, 1986. – № 12. – С. 46

# ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФОРМУЛИРОВКИ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТИ

Остапович К. В., Трусов П. В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
д. 29, Комсомольский пр., г. Пермь, 614990, Россия, ostkirvad@gmail.com

Работа посвящена развитию методики вычислительного проектирования поликристаллических изделий с наилучшими эксплуатационными характеристиками, достигаемыми в технологических процессах изготовления за счет деформационного текстурообразования (т.е. перераспределений ориентаций кристаллитов с возникновением неоднородностей). Наличие текстуры обуславливает макроскопическую анизотропию многих физико-механических свойств материалов, согласованность которой с предполагаемыми для создаваемых деталей и конструкций воздействиями определяет качество их функционирования. Формулируется следующая так называемая задача функционально-ориентированного проектирования (ЗФОП): требуется найти режим деформирования поликристаллической заготовки, реализующий в готовом изделии рациональное с позиции дальнейшей эксплуатации поле меры распределения ориентаций (ПМРО), количественно описывающее текстуру в его объеме.

Рассматриваемая ЗФОП представляется в виде системы связанных оптимизационных подзадач. Первая, условно именуемая F-подзадачей, состоит в установлении на конфигурации изделия ПМРО, обеспечивающих его наилучшее функционирование с точки зрения некоторого критерия. Вторая, или T-подзадача, сводится к определению режимов деформирования заготовки, результирующих в ПМРО, наиболее близкие к полученным в рамках F-подзадачи. Следует заметить, что математическая постановка указанных подзадач требует привлечения определяющих соотношений, позволяющих описывать текстуры в поликристаллах, их эволюцию при деформировании и связь с эффективными свойствами. Для этой цели в работе используется статистическая многоуровневая конститутивная модель, построенная на базе физических теорий упруговязкопластичности [1–5]. Предлагаемая в рамках такого подхода схема решения ЗФОП изображена на рис. 1. Каждый из обозначенных отдельным блоком этапов предполагает выполнение всех предшествующих, отмеченных основаниями ведущих к нему стрелок.

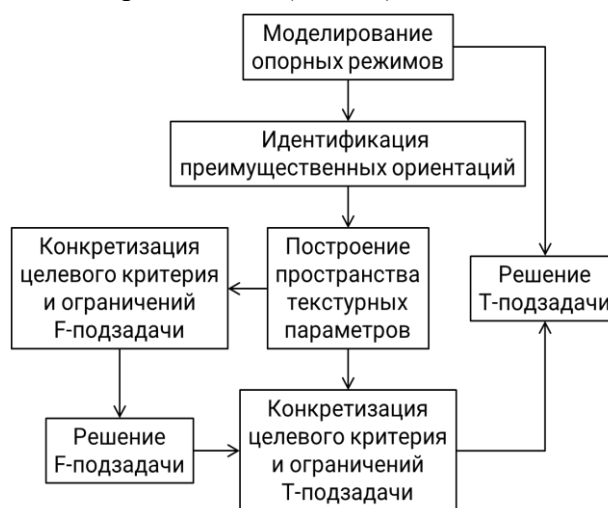


Рис. 1. Стадии решения ЗФОП в последовательности их реализации

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (при выполнении государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

## Литература

1. Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019, 605 с.
2. К.В. Остапович, П.В. Трусов, А.Ю. Янц. Физическая мезомеханика. 2020, Т. 23, № 5. 20-33.
3. K.V. Ostapovich, P.V. Trusov. Crystals. 2021, V. 11, 336.
4. K.V. Ostapovich, P.V. Trusov. Lobachevskii Journal of Mathematics. 2022, V. 43, No. 7, 1962–1975.
5. P.V. Trusov, K.V. Ostapovich. Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023, V. 44, No. 10, 4474–4488.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ УПРУГО-ХРУПКИХ ТЕЛ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УЧЕТЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ЗНАЧЕНИЙ ПРОЧНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Феклистова Е. В., Вильдеман В. Э., Мугатаров А. И.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Российская Федерация,  
e-mail: cem.feklistova@mail.ru; wildemann@pstu.ru; cem\_mugatarov@mail.ru*

Обеспечение прочности, надежности и безопасности ответственных конструкций требует изучения их механического поведения не только в штатных условиях, но и в условиях зарождения и развития макродефектов [1-3]. Существует множество подходов и моделей поведения материалов для моделирования распространения трещин и накопления повреждений в твердых телах. Одним из широко распространенных является подход, связанный с редуцированием жесткостных характеристик конечных элементов, в которых выполняется критерий разрушения. Данный подход является одним из наиболее простых, при этом требует учета ряда аспектов [4]. Кроме того, существенное влияние на результаты моделирования процесса разрушения оказывает статистическое распределение механических свойств структурных элементов по объему тела.

В данной работе проводится численное исследование влияния статистического разброса прочностных характеристик конечных элементов на характер разрушения упруго-хрупкой пластины с концентратором напряжений. Разработана новая постановка краевой задачи и алгоритм ее решения, реализованный на языке программирования APDL. Проведен ряд вычислительных экспериментов, по результатам которых проанализированы диаграммы нагружения и соответствующие графики роста числа разрушенных элементов для различных величин разброса пределов прочности. Учет процесса разрушения позволил выявить дополнительную несущую способность. Отмечено реализация закритической стадии деформирования на макроуровне. Изучено влияние размаха распределения пределов прочности на величину максимальной нагрузки, кинетику процессов накопления повреждений. Определено влияние глубины концентратора на процессы разрушения упруго-хрупких тел. Сделан вывод о значительном влиянии статистического разброса прочности элементов конструкции структурных элементов на прочностные резервы и характер развития повреждений [5].

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-19-00765 в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

## *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. Bažant, Z.P. *Instability, ductility, and size effect in strain-softening concrete*, *Journal of the engineering mechanics division*, 1976, 102 (2), 331-344
3. Bažant, Z.P. and Di Luzio G. *Nonlocal microplane model with strain-softening yield limits*, *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41 (24-25), 7209-7240. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2004.05.065.
4. Wildemann, V.E., Feklistova, E.V., Mugatarov, A.I., Mullahmetov, M.N., and Kuchukov, A.M. (2023). *Aspects of numerical simulation of failure of elastic-brittle solids*, *Computational Continuum Mechanics*, 16 (4), 420-429. DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.4.35.
5. Feklistova, E., Mugatarov, A., Wildemann, V., & Agishev, A. *Fracture processes numerical modeling of elastic-brittle bodies with statistically distributed subregions strength values*. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 2024, 18(68), 425–439. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.68.22>.

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРИКЦИОННОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Атамашкин А. С.<sup>1</sup>, Приймак Е. Ю.<sup>1</sup>, Сёмка Я. С.<sup>1</sup>, Трушов В. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, 13, пр. Победы, 460018, [atamashkin2017@yandex.ru](mailto:atamashkin2017@yandex.ru)

Ротационная сварка трением позволяет получить качественные сварные соединения трудносвариваемых материалов, в частности среднеуглеродистых сталей, которые широко применяются при производстве бурильных труб. Процесс РСТ состоит из нескольких последовательных стадий при этом приконтактные поверхности свариваемых заготовок испытывают термомеханическое воздействие в результате чего возникает градиентная область, обладающая структурной и механической неоднородностью. При этом в зоне сварки выделяют три характерные зоны: зона стыка, зона термомеханического влияния, зона термического влияния.[1]

В качестве свариваемых образцов применялись трубные заготовки  $\varnothing 73 \times 9$  32ХГР и сталь марки 40ХН2МА. Сварку осуществляли на сварочной машине с прямым приводом Thompson-60 на следующих режимах: сила трения 145 кН, частота вращения 600 мин<sup>-1</sup>, усилие проковки 280 кН, длина оплавления 7 мм. Исследуемые образцы со сварным соединением вырезались из сваренных заготовок параллельно оси вращения.

Диурометрические исследования, рисунок 1, сварного соединения наглядно

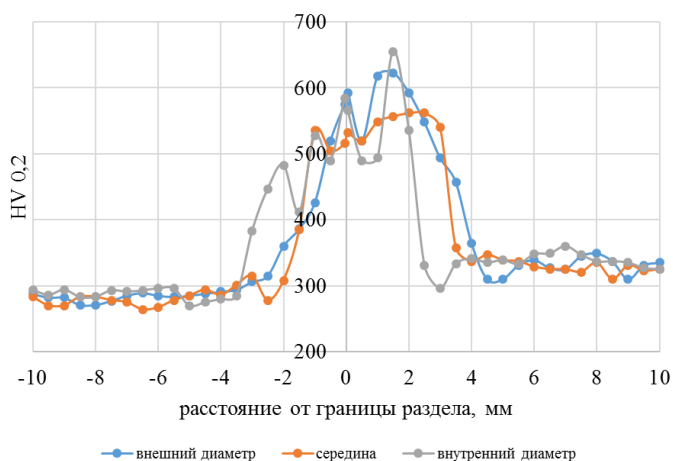


Рис. 1. Профили микротвердости вблизи внешнего диаметра, посередине и вблизи внутреннего диаметра сваренных труб

представляют градиентную структуру сварного соединения. Стоит отметить, что в ЗТМВ микротвердость изменяется скачкообразно, что обусловлено неоднородностью микроструктуры ввиду отдельных участков продуктов распада аустенита. Максимальная твердость (623 HV 0,2) зафиксирована в ТМАЗ со стороны стали 40ХН2МА. По мере удаления от границы сопряжения наблюдается тенденция к снижению микротвердости. В ХАЗ значения микротвердости практически не отличаются от значений исходных сталей, которые составили 271-288 HV 0,2 для стали 32ХГР и 310-347 HV 0,2 для стали 40ХН2МА.[2]

Испытаниями на статическое растяжение установлено, таблица 1, что прочность сварного соединения не уступает по прочности свариваемым материалам. Деформация растяжения происходит со стороны стали 32ХГР с последующим разрушением в зоне основного металла на расстоянии 16-17 мм от сварного стыка.

Таблица 1 - Механические свойства испытываемых материалов

Материал	$\sigma_T$ (МПа)	$\sigma_B$ (МПа)	$\delta$ (%)
32ХГР	777-792	894-907	14,5-15,5
40ХН2МА	870-885	984-998	10,5-11,0
свар. соед.	873,19	948,81	20,04

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-01311, <https://rscf.ru/project/23-79-01311>

## Литература

1. Vill, V.I.: *Friction welding of metals. Mashinostroenie (1970)*
2. Priymak, E.Yu., Atamashkin, A.S., Kuzmina, E.A., Tulibaev E.S.: *The use of rotational friction welding for manufacture of exploration drill pipes: Industrial experience and research. Chernye Metally, 4, 37-42 (2020)*

# ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РЕАЛИЗАЦИЮ СТАДИИ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА В ОПЫТАХ НА СДВИГ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Вильдеман В. Э.<sup>1</sup>, Мугатаров А. И.<sup>1</sup>, Староверов О. А.<sup>1</sup>, Струнгарь Е. М.<sup>1</sup>,  
Чеботарева Е. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Работа посвящена экспериментальному изучению закономерностей влияния предварительных циклических и дополнительных вибрационных воздействий на реализацию стадии закритического деформирования перекрестно-армированного углепластика  $[\pm 45]_n$  в опытах на сдвиг при растяжении [1,2]. Методика испытаний основана на стандартах ASTM D3518 и ASTM D3479. Рассмотрены четыре вида испытаний: активное нагружение образцов до разрушения; растяжение с наличием ряда разгрузок; деформирование с действием дополнительных крутильных вибраций различной амплитуды; предварительное циклическое растяжение с различной наработкой без усталостного разрушения и последующим квазистатическим растяжением. Поля сдвиговых деформаций построены с использованием видеосистемы анализа полей перемещений VIC 3D, регистрация акустического отклика получены системы регистрации сигналов акустической эмиссии AMSY-6 [3]. Получены изображения поверхности исследуемых образцов при квазистатическом растяжении с локализацией процесса разрушения в виде шейки. Представлены результаты ультразвукового контроля поврежденных образцов после циклической наработки. Построены диаграммы деформирования в истинных напряжениях с ниспадающими участками. Определены механические свойства материала. Отмечено наличие различных стадий процесса накопления повреждений. Проанализирована эволюция неоднородных полей деформаций, отмечено развитие шейки на стадии разупрочнения. Отмечено влияние жесткости нагружающей системы на срыв с диаграммы нагружения. Исследованы различные методики расчета сдвиговых деформаций с использованием инструмента «виртуальный экстензометр». Выявлено снижение модуля сдвига по мере роста пластических сдвиговых деформаций. Проведен анализ сигналов акустической эмиссии, отмечено наличие трех характерных частотных диапазонов. Определены основные поверхностные дефекты. Выявлено, что наличие дополнительных вибраций приводит к увеличению протяженности стадии разупрочнения. Сделан вывод о рациональности учета закритической стадии деформирования и жесткости нагружающей системы при проведении прочностного анализа конструкций.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00765) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

## Литература

1. Wildemann, V., Staroverov, O., Strungar, E., Lunegova, E., Mugatarov, A. (2022). Stability of postcritical deformation of CFRP under static  $\pm 45^\circ$  tension with vibrations, *Polymers*, 14(21), 4502. DOI: 10.3390/polym14214502.
2. Wildemann, V.E.; Staroverov, O.A.; Yankin, A.S.; Mugatarov, A.I. Description of fatigue sensitivity curves and transition to critical states of polymer composites by cumulative distribution functions. *Frat. ed Integrita Strutt.* 2023, 17. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.63.09>.
3. Wildemann, V., Strungar, E., Lobanov, D., Mugatarov, A., Chebotareva, E. (2023). Experimental study of postcritical deformation stage realization in layered composites during tension using digital image correlation and acoustic emission, *Acta Mechanica Sinica*. DOI: 10.1007/s10409-023-23468-x. Available at: <https://www.sciengine.com/AMS/doi/10.1007/s10409-023-23468-x>



# ОСЛАБЛЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ПРЕГРАДАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК6, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

Кленов А. И.<sup>1</sup>, Бродова И. Г.<sup>2</sup>, Петрова А. Н.<sup>2</sup>, Смирнов Е. Б.<sup>1</sup>, Гармашев А. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», 13, Васильева, а/я 245, г. Снежинск  
456770, Россия, vniitf@vniitf.ru

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 18, С. Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Россия, petrova@imp.uran.ru

В настоящее время в космической и оборонной отраслях получили развитие работы по созданию изделий, применяемых как амортизаторы для энергопоглощения, например, в качестве защитных слоев в посадочных системах космических аппаратов или в качестве бронепреград. С развитием аддитивных технологий, позволяющих регулировать формообразование материалов, появилась возможность замены монолитных изделий на сетчатые структуры разной топологии, обладающие достаточно высоким уровнем механических характеристик при более низкой массе. Проведенные ранее авторами эксперименты показали, что среди сетчатых структур из сплава АК6 наилучшими механическими характеристиками обладают образцы с топологией трижды периодической поверхности минимальной энергии типа гироид. Были исследовано влияние режимов селективного лазерного сплавления (СЛС) и геометрических характеристик гироидов на качество изделий и наличие в них дефектов литейного происхождения и их взаимосвязь с твердостью и прочностными свойствами. Целью данной работы является изучение возможности применения сетчатых изделий из сплава АК6 в качестве преград для ослабления ударных волн.

Эксперимент по исследованию эволюции волны сжатия по мере её распространения в сетчатых образцах проводили с использованием экспериментального узла, состоящего из генератора плоской ударной волны, исследуемого образца-преграды, алюминиевого экрана и буфера из мрамора с установленным в нём манганиновым датчиком. В качестве преград были взяты СЛС гироиды с одинаковыми геометрическими характеристиками: размер ячейки 3 мм, толщина стенки 0.2 мм и плотностью от 0.72-0.79 г/см<sup>3</sup>. Эксперименты проводили на образцах квадратной формы (30х30 мм) разной толщины от 9 до 21 мм с целью определения влияния толщины преграды на эффект ослабления ударной волны. Учитывая зависимость свойств гироидов от количества дефектов, регулируемых условиями СЛС, проведено сравнение эффектов взаимодействия ударных волн с преградами, полученными при двух режимах 3D печати. На рисунке показана зависимость напряжения сжатия от толщины преграды для разных режимов СЛС. Затухание ударной волны пропорционально толщине преграды, что позволяет оценить необходимую толщину для ослабления ударной волны до требуемой амплитуды.

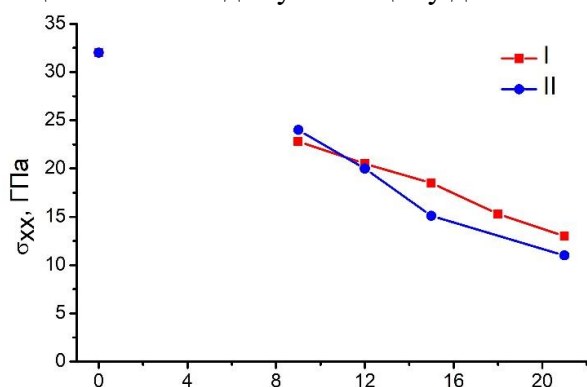


Рис. Зависимость продольного напряжения сжатия от толщины преграды

Установлено, что при толщине преграды 9 мм наблюдается затухание ударной волны в 1.5 раза, а увеличение толщины до 21 мм дополнительно ослабляет ударные волны в 2.5 раза (режим СЛС I). Повышение качества СЛС гироидов за счет оптимизации режима СЛС (режим II) дает дополнительный эффект 10-20%. Таким образом, использование гироидов в качестве преград позволяет эффективно ослаблять ударные волны. Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России №122021000033-2, шифр «Структура».

**МЕХАНИКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ.  
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА**

Юсупов Д. Т.

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный  
Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина»,  
Снежинск, Россия*

Исследованы особенности деформации и критерии перекрытия металлических трубок под действием ударной волны подводного взрыва. Полученные данные имеют непосредственное отношение к постановке и анализу результатов опытов по моделированию перекрытия скважин в прочных средах, могут быть использованы для исследования параметров разрушения и устойчивости различного вида трубопроводов. Наконец, результаты этих исследований позволили обосновать и предложить способ измерения координат изобарических поверхностей произвольной формы с помощью протяженных трубчатых датчиков давления. С помощью этого способа удалось сравнить параметры подводного и взрывов вблизи поверхности.

**THE MECHANICS OF DAMAGES AND THE DESTRUCTIONS.  
FEATURES OF DEFORMATION OF METAL-PIPE COLLAPSE UNDER THE SHOCK  
WAVE GENERATED BY THE UNDERWATER EXPLOSION**

Yusupov D. T.

*Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics  
(RFNC-VNIITF)*

Features of deformation and criteria of metal-pipe collapse under the shock wave generated by the underwater explosion were investigated. The obtained data are closely related to the experimental setup and analysis of experiments simulating the borehole blockage in high-strength media. These data can be used to study destruction-and-stability parameters for different pipelines. In addition, results of this investigation made it possible to validate and propose the method for measuring coordinates of arbitrary-shape isobaric surfaces using extended tubular pressure transducers. This method also allowed comparison of parameters of underwater and near-surface explosions.

## Трибологическое тестирование пластин (-201) бета-оксида галлия для подложек

Шарков М. Д.<sup>1</sup>, Бойко М. Е.<sup>1</sup>, Бутенко П. Н.<sup>1</sup>, Бойко А. М.<sup>1</sup>, Поздняков А. Е.<sup>1</sup>,  
Чикиряка А. В.<sup>1</sup>, Алмаев А. В.<sup>2</sup>, Николаев В. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 26, Политехническая ул., Санкт-Петербург, 194021,  
Россия; [mischar@mail.ru](mailto:mischar@mail.ru), [boikomix@gmail.com](mailto:boikomix@gmail.com)

<sup>2</sup>НИ ТГУ, 36, Ленина пр., Томск, 634050, Россия

Проведены трибологические и механические тесты кристаллических пластин  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\bar{2}01$ ), изготовленных для применения в качестве подложек методом прикраевой подпитки пленок (Edge-Defined-Film-Fed-Growth, EFG) [1].

Для обеих сторон пластины, ростовой и обратной, были измерены коэффициенты трения и износа. Для коэффициента сухого трения при применении сапфирового шарика в качестве контртела получена величина около 0.063. Коэффициенты износа, как оказалось, существенно различаются после разных методов постростовой обработки образца:  $1.1 \cdot 10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/Н·м в случае стандартной полировки и  $2.2 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>3</sup>/Н·м при применении химико-механической полировки.

Продемонстрировано появление порошковой фазы  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> внутри следа трения при использовании сапфирового шарика в роли контртела.

Проанализирована возможная взаимосвязь между, с одной стороны, коэффициентами трения и износа и, с другой стороны, твердостью материалов образца и контртела. Твердость кристаллов  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в направлении [ $\bar{2}01$ ] оказалась сравнительно высокой (около 90 кбар). При этом образцы, поверхность которых была подвергнута химико-механической полировке, показали меньшие значения твердости, чем образцы, обработанные посредством стандартной полировки. Также оказалось, что более низким значениям твердости в случае пластин  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\bar{2}01$ ) отвечают меньшие величины коэффициента трения. Таким образом, установлено, что образцы, поверхность которых тщательнее обработана и поэтому является более гладкой, демонстрируют более низкие механические показатели (твердость, коэффициенты трения и износа) по сравнению с образцами, прошедшими более грубую обработку.

Сформулировано предположение, что причина пониженных механических и трибологических характеристик образцов, подвергнутых обработке в большем объеме (с использованием химико-механической полировки), состоит в том, что для таких образцов свойственны повышенные некомпенсированные механические напряжения. Таковые, в свою очередь, могли появиться в приповерхностных слоях образцов в процессе полного цикла постростовой обработки.

### Литература

1. P.N. Butenko, M.E. Boiko, A.V. Chikiryaka, L.I. Guzilova, A.O. Pozdnyakov, M.D. Sharkov, A.V. Almaev, V.I. Nikolaev. *Materials Physics and Mechanics*. 2023, V. 51, Num. 5, 153–161.

# О РАЗЛИЧНЫХ УПРОЩЕННЫХ МОДЕЛЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И ИХ ВЛИЯНИИ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Наседкин А. В.

*Южный федеральный университет, 105/42, ул. Б. Садовая, г. Ростов-на-Дону, 344006, Россия, avnasedkin@sfnu.ru*

Сплошная пьезокерамика обычно рассматривается в рамках линейной теории электроупругости как однородный анизотропный материал гексагональной сингонии класса *6mm*. Ее электромеханические модули тогда имеют свойства трансверсально-изотропного материала, для которого ось  $Ox_3$  совпадает с осью поляризации, а положение осей  $Ox_1$  и  $Ox_2$  в перпендикулярной плоскости не существенно. Однако в случае композита с пьезокерамической матрицей и с включениями из упругого материала или с порами модули эффективной гомогенной среды могут иметь свойства материалов других классов анизотропии. Этот эффект может быть вызван наличием преимущественной ориентацией включений или пор вдоль отдельных направлений, а также анизотропией представительных объемов или ячеек периодичности в метаматериалах. Кроме этого, в композитной структуре пьезокерамическая матрица может быть уже неоднородно поляризованной, поскольку поле поляризации будет неоднородным в окрестностях включений или пор. Особенно это будет заметно для пьезокомпозитов с металлическими включениями или для пористых пьезокомпозитов с металлизированными поверхностями пор [1]. В таких случаях при вычислении эффективных модулей необходимо учитывать неоднородную поляризацию пьезокерамической матрицы композита.

В первой части доклада рассматриваются различные упрощенные модели предварительной поляризации пьезокерамики в представительных объемах пьезокомпозитов. В их основе лежит решение по методу конечных элементов задачи электростатики композитного диэлектрика в линейной постановке при действии электрического поля вдоль предполагаемой оси поляризации. В этой задаче считается, что композит состоит из неполяризованной пьезокерамической матрицы, которая рассматривается как изотропный материал, и включений или пор. В результате решения задачи, имитирующей процесс поляризации, находятся поле электрической индукции и напряженность электрического поля, а по ним определяется поле поляризации, которое получается неоднородным как по направлению, так и по модулю. Далее в представительном объеме композита его матрица рассматривается уже как поляризованная пьезокерамика с неоднородными электромеханическими свойствами.

Обсуждаются различные модели поляризации, которые отличаются методами определения модулей неоднородно поляризованной пьезокерамики по найденным направлениям и значениям вектора поляризации, модулям неполяризованной керамики и модулям однородно поляризованной пьезокерамики в локальных системах координат, связанных с направлением вектора поляризации [2]. При этом в развитии моделей из [2] рассматриваются также модифицированные модели определения модулей однородно поляризованной пьезокерамики с использованием модулей однородно поляризованной пьезокерамики из различных форм определяющих соотношений, а также модели «суперполяризации» с ограничением на величину коэффициента интенсивности поляризованного поля.

Во второй части доклада изучаются задачи гомогенизации пьезокомпозитов с неоднородно поляризованной пьезокерамической матрицей, модули которой вычислены по предложенным ранее моделям. Приведены результаты расчетов эффективных свойств различных пьезокомпозитов и анализируется их зависимости от моделей поляризации.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 22-11-00302.

## *Литература*

1. A. Nasedkin, M.E. Nassar. *J. Adv. Dielectr.* 2021, V. 11, No. 5, 2160009.
2. А.В. Наседкин, А.А. Наседкина, Я.В. Толмачева. *Вычисл. мех. сплош. сред.* 2023, Т. 16, № 4, 476-492.

# КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ НАНОРАЗМЕРНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Долгополова Л. Ю., Наседкин А. В., Наседкина А. А.

*Южный федеральный университет, 105/42, ул. Б. Садовая, г. Ростов-на-Дону, 344006,  
Россия, avnasedkin@sfnedu.ru*

Многочисленные исследования в наномеханике выявили масштабный эффект, заключающийся в изменении различных модулей материала для наноразмерных тел по сравнению с соответствующими модулями тел макроразмеров. Для обоснования этого эффекта был разработан ряд теорий. Одной из таких теорий является модель поверхностной упругости. К настоящему времени уже имеется ряд обзорных статей, посвященных исследованиям поверхностной теории упругости и ее приложений. Среди теорий поверхностной упругости наиболее популярной является модель Гуртина-Мурдоха. В этой модели границы наноразмерного тела покрыты упругими мембранами, внутренние усилия в которых определяются поверхностными напряжениями. Упругие мембраны могут быть размещены и на интерфейсных границах внутри тела с наноразмерными включениями или порами, что позволяет промоделировать несовершенные межфазные границы со скачками напряжений в наноструктурированных композитах.

В данной работе изучаются термомеханические эффективные свойства наноструктурированных термоупругих трансверсально-изотропных пористых материалов со случайным распределением пор. Наноразмерность межфазных границ учитывалась с использованием модели поверхностных напряжений Гуртина-Мурдоха и модели сильной теплопроводности, в которых масштабный фактор был связан с размерами пор.

Для моделирования представительных объемов и расчета эффективных модулей использовались теория эффективных модулей механики композитов и метод конечных элементов. В соответствии с методом эффективных модулей для построенного объема решались статические задачи термоупругости и теплопроводности с линейными главными граничными условиями. Эти задачи гомогенизации решались численно в конечно-элементном пакете ANSYS.

Использовались кубические представительные объемы с гексагональными термоупругими конечными элементами и со случайным распределением пор. Для учета наноразмерной структуры пор границы контакта материала с порами покрывались поверхностными мембранными термоупругими элементами. При этом для мембранных элементов были заданы трансверсально-изотропные свойства материала в соответствии с расположением элементных систем координат и типом поверхностной анизотропии объемных элементов в этих системах координат [1]. Далее были рассчитаны осредненные напряжения и тепловые потоки, которые определили эффективные термоупругие модули. При этом вначале по методике, представленной в [2], определялись эффективные упругие модули из решений задач термоупругости при определенных ненулевых смещениях на внешней границе представительного объема и при нулевой температуре. Далее с использованием найденных эффективных модулей жесткости вычислялись эффективные температурные напряжения из решений аналогичных задач, но при постоянном ненулевом температурном поле внутри объема. Наконец, эффективные коэффициенты теплопроводности определялись из решения отдельных несвязанных тепловых задач.

В качестве примера были рассмотрены задачи для титана с наноразмерными порами. Результаты расчетов позволили проанализировать зависимости эффективных термоупругих модулей от пористости и поверхностных эффектов.

## *Литература*

1. A.V. Nasedkin, A.A. Nasedkina, A. Rajagopal. Springer Proceedings in Materials. 2020, V. 6, 325-337.
2. A.B. Наседкин, А.С. Корниевский. Вычисл. мех. сплош. сред. 2017, Т. 10, № 4, 375-387.

# СИНХРОННЫЙ РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ СРОКАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ И ДИАГНОСТИКА ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ ТЕМПОВ НАГРЕВА

Дегтярь В. Г.<sup>1</sup>, Гусев В. В.<sup>1</sup>, Калашников С. Т.<sup>1,2</sup>, Костин Г. Ф.<sup>1,2</sup>, Новиков А. И.<sup>1,3</sup>, Хлыбов В. И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО "Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева", г. Миасс, Челябинская обл., Россия, src@makeyev.ru

<sup>2</sup> Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, finigz@mineralogy.ru

<sup>3</sup> Филиал в г. Миассе ГОАУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Миасс, Челябинская обл., Россия, info@miass.susu.ru

При расчетах тепловлажностных и температурных режимов изделий при длительных сроках хранения и эксплуатации необходим учет изменения свойств материалов в процессе старения. Обозначая исходные, не измененные значения ТФХ нижним индексом «н», а дополнительные изменения вследствие старения волной сверху, зависимость для изменения свойств материалов при эксплуатации и хранении можно представить в виде

$$\eta = \eta_n + \tilde{\eta} \left( \theta, T, \int_0^\tau \left( k_\eta e^{-\frac{E_\eta}{RT}} \right) d\tau \right), \quad (1)$$

где  $\eta$  – индекс свойства материала;  $E_\eta$  – энергия активации процессов изменения -того свойства при старении (например, теплопроводности  $\lambda$ );  $k_\eta$  – предэкспонентные множители в уравнении Аррениуса,  $R$  – газовая постоянная,  $\theta$  – потенциал влажности,  $T$  – температура,  $R$  – газовая постоянная,  $\tau$  – время. Параметры  $E_\eta$  и  $k_\eta$  определяются по результатам ускоренных климатических испытаний (УКИ) с учетом анализа данных по изменениям свойств при натурной эксплуатации и других данных. Значения с волной являются относительно малыми по сравнению с исходными, поэтому, подставляя в уравнение теплопроводности

$$(c_p \rho) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q_v, \quad (2)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $q_v$  – тепловыделение (телопоглощение, источник, сток),  $\rho$  – плотность материала, соответствующие  $c_p$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  выражения (1) и отбрасывая малые второго и большего порядков, с учетом тождественного выполнения уравнения (2) при исходных значениях свойств получим подобное (2) уравнение для дополнительного изменения температуры  $\tilde{T}$  за счет изменения свойств. Аналогично и для расчета влажностных режимов при длительных сроках хранения и эксплуатации, так как уравнения теплопроводности и влагопроводности подобны.

В обеспечение расчетов тепловых режимов изделий в условиях интенсивного нагрева, например, летательных аппаратов при их полете по траектории, важно диагностировать, как изменятся теплофизические характеристики материалов после длительных сроков хранения, в том числе как изменятся зависимости характеристик от темпов нагрева. В работе представлена экспериментальная установка для одновременного испытания в каждом пуске до четырех образцов, в частности, прошедших и не прошедших УКИ, при различных темпах нагрева. Представлен также метод определения теплофизических характеристик материалов по результатам измерений температуры образцов на различной глубине при переменных темпах нагрева с применением при анализе результатов испытаний аппроксимационно-суперпозиционного метода для решения обратной задачи теплопроводности [1].

## Литература

1. Костин, Г. Ф. Применение аппроксимационно-суперпозиционного метода для восстановления теплофизических характеристик материалов по результатам тепловых испытаний // Г. Ф. Костин, С. Т. Калашников, В. В. Гусев, Н. А. Решетников, Т. В. Тукачева // Конструкции из композиционных материалов. – 2020. № 1. – С. 37–42.

# ОТДАЛЁННЫЕ ИСХОДЫ ИНТЕРВЕНЦИОННЫХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ У БОЛЬНЫХ СТАБИЛЬНОЙ СТЕНОКАРДИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКИХ ГРАДАЦИЙ

Миронов В. А.<sup>1,2</sup>, Николаенко О. В.<sup>1</sup>, Куватов В. А.<sup>3</sup>, Куватова Е. В.<sup>3</sup>, Привалова В. В.<sup>4</sup>,  
Цаплина П. К.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный медицинский университет, 3, ул. Репина, Екатеринбург, 620014, Россия, [vamironov2013@yandex.ru](mailto:vamironov2013@yandex.ru)

<sup>2</sup>5 военный клинический госпиталь войск национальной гвардии РФ, 10, ул. Соболева, Екатеринбург, 620043, Россия, [vamironov2013@yandex.ru](mailto:vamironov2013@yandex.ru)

<sup>3</sup>Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии РФ, 2, пр. Героя России Родионова Е.Н., Челябинск, 454103, Россия, [kva.56@yandex.ru](mailto:kva.56@yandex.ru)

<sup>4</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Россия, [valentprival@gmail.com](mailto:valentprival@gmail.com)

Реваскуляризация у больных со стабильной стенокардией напряжения (ССН) с помощью чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ) направлена на устранение ишемии миокарда и ее неблагоприятных клинических проявлений у пациентов с коронарным стенозом, для снижения риска развития инфаркта миокарда (ИМ), сердечно-сосудистой смерти (ССС). Многочисленные исследования показали небольшое преимущество применения ЧКВ в выживаемости промежуточных и конечных точек [1].

Оценить отдаленные результаты после проведения ЧКВ пациентам со ССН.

В данной работе представлены результаты проспективного наблюдения в группах исследования через 3 года после выполнения стентирования коронарных артерий (КА) при ЧКВ пациентам со ССН. Всем пациентам в начале исследования была проведена ритмокардиография (РКГ) с синхронной записью электрокардиографии (ЭКГ), в покое и пробах до- и после ЧКВ. По данным полученных результатов исходной РКГ и обследования пациентов через 3 года после ЧКВ, было сформировано 3 группы [2,3]: I группа, 48 пациентов – ССН 3ФК с типичными симптомами [1]; II группа, 52 пациента – ССН 3ФК с признаками хронической инфекции (ХрИн); III группа, 26 человек – ССН 4ФК с признаками автономной кардиомиопатии (АК). Результаты исследования приведены в таблице 1. Для статистического анализа было использовано отношение шансов (ОШ) с расчетом доверительного интервала (ДИ). Уровень статистической значимости  $p < 0,05$ .

Таблица 1 – Результаты проведенного стентирования КА при ЧКВ через 3 года

Группа	ССН 3ФК	ИМ	Инсульт	ССС	Повторное ЧКВ	Развитие инфекционных заболеваний
	абс.	абс.	абс.	абс.	абс.	абс.
I - 48	5	2	2	2	8	2
II - 52	5	2	2	2	8	10
III - 26	9	7	3	5	9	2

Через 3 года после стентирования ССН возникала в 4,5 раза чаще у пациентов с АК, чем у пациентов с исходной ССН ОШ 4.553 (95% ДИ: 1.332-15.561) и в 5 раз чаще у пациентов с АК, чем у пациентов с ХрИн (95% ДИ: 1.461-16.956). ИМ возникал в 8,5 и 9 раз чаще у пациентов с АК, чем у пациентов со ССН (95% ДИ: 1.611-44.562) и пациентов с ХрИн (95% ДИ: 1.755-48.339) соответственно. ССС возникала в 6 раз чаще у пациентов с АК, чем у пациентов с ХрИн (95% ДИ: 1.069-33.149). Инфекционные заболевания развивались в 5 раз чаще у пациентов с ХрИн, чем у пациентов со ССН (95% ДИ: 1.134-26.448). В остальных исследуемых группах достоверных различий выявлено не было.

## Литература

1. Ju. Knuuti, W. Wijns, A. Saraste [et al.] *Russian Journal of Cardiology*. 2020, Vol. 25, No. 2, 119-182.
2. Патент № 2322942 от 31.10.2006 «Способ дифференциальной диагностики стенокардии» Авторы: Т.Ф.Миронова, В.А.Миронов, М.В.Миронов.
3. Mironov V.A., Popov A.A., Akimova A.V., Mironova T.F., Gagiev V.V., Kuvatova E.V. *Procedia Structural Integrity: 15th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2021, Ekaterinburg, 20–24 декабря 2021 года. Elsevier B.V., 2022, 307-313.*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКОВОК ИЗ СПЛАВА АМГ6

Бурибаев Э.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уральский Федеральный университет, 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, 620002, Россия

<sup>2</sup>ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», 5, ул. Заводская, г. Каменск-Уральский, 623405, Россия

[buribaev@kumz.ru](mailto:buribaev@kumz.ru)

К сплавам системы Al-Mg относится большая группа широко используемых в промышленности сплавов. Химический состав исследуемых в работе сплавов системы Al-Mg приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав сплава по ГОСТ 4784-97

Марка сплава	Массовая доля элементов, %								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be
АМг6	0,4	0,4	0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	–	0,2	0,02-0,10	0,0002-0,005

В условиях КУМЗа технологическая схема производства поковок толщиной не менее 80 мм заключается в следующем: отливка слитков круглого сечения заданного типоразмера – гомогенизация – механическая обработка по диаметру – нагрев – ковка – отжиг – исследования на соответствие требованиям стандарта – сдача – упаковка.

Полуфабрикаты и детали из сплава АМг6 подвергаются полному отжигу. Температурный интервал полного отжига 310-335<sup>o</sup>С, длительность выдержки при толщине более 6 мм от 30 до 180 мин, охлаждение на воздухе [1].

Цель работы заключается в определении продолжительности отжига на структуру и механические свойства поковок из сплава АМг6.

Для достижения поставленной цели были изучены макро- и микро- структуры, механических свойств поковок из сплава АМг6 после обработки по семи режимам с изменением времени выдержки и количества отжигов. Были изучены макро- и микроструктуры, определен размер зерна

В работе были исследованы механические свойства – предел прочности, предел текучести, относительное удлинение (рисунок 1) [2].

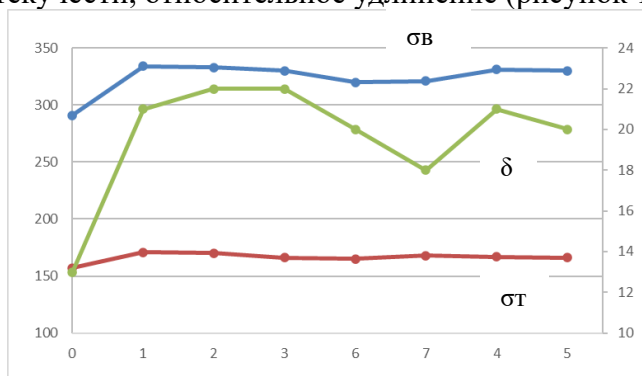


Рис. 1. Изменение механических свойств поковок из сплава АМг6 при разных режимах отжига

Снижение механических свойств при продолжительных выдержках по режимам 6 и 7 (повторный нагрев и дополнительные выдержки) обусловлено растворением упрочняющей β-фазы (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>) и образованием гомогенной структуры, что сопровождается процессом образования новых равновесных зерен с уменьшением их размера [3].

По результатам работы определено влияние продолжительности выдержки на механические свойства и размер зерна поковок из сплава АМг6. Определен

оптимальный режим отжига: tн=320<sup>o</sup>С, выдержка 60 мин; охлаждение на воздухе до t=20<sup>o</sup>С (режим 3).

## Литература

1. ПИ 1.2.699-2007 «Термическая обработка полуфабрикатов и деталей из алюминия и алюминиевых деформируемых сплавов».
2. ОСТ 1 90073-85 «Штамповки и поковки из алюминиевых сплавов. Технические условия».
3. Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд./Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. 2-е изд. перераб. и доп. – М: Металлургия. 1984. 528 с.



# К ВЫБОРУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ (Cu-Fe) ИЗ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ ОТ РАЗМЕРА ЗЕРЕН ПРИ ДИСПЕРСИОННОМ УПРОЧНЕНИИ-РАЗУПРОЧНЕНИИ

Решетняк А. А.<sup>1,2</sup>, Шамшутдинова В. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 30, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия, [reshetnyak@tpu.ru](mailto:reshetnyak@tpu.ru), [Shamshut@tpu.ru](mailto:Shamshut@tpu.ru)

<sup>2</sup>Томский государственный педагогический университет, 62, ул. Киевская, Томск, 634061

В рамках статистического подхода развитого в наших работах в 2016-2023 [1-3] к получению прочностных характеристик поликристаллических (ПК) материалов с равновесной дефектной структурой (РДС), полученных при ИПД, предложены 2 базисные функции распределения дефектов в зависимости от размеров зерен  $d$ , основного дислокационного ансамбля с вектором Бюргерса  $b$ , модуля сдвига  $G$ , температуры  $T$  в одномодальном ПК материале:

$$\frac{d\bar{n}}{\bar{n}} = f_N^{MB}(b, x^{-2}, T)dx = 4\pi \left(\frac{Mb}{\pi}\right)^{3/2} x^2 e^{-Mbx^2} dx, \quad x = d^{-1/2}, \quad M = \frac{Gb^3}{2kT}; \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{n}}{\bar{n}} = f_N^{BE}(b, x^{-2}, T)dx = \left(\frac{3\sqrt{\pi}}{8} \zeta\left(\frac{5}{2}\right) (Mb)^{-5/2}\right)^{-1} x^4 (e^{Mbx^2} - 1)^{-1} dx, \quad \zeta\left(\frac{5}{2}\right) = 1,34149. \quad (2)$$

Здесь  $\bar{n}$  – концентрация дефектов,  $k$  – постоянная Больцмана,  $M$  – энергетический масштаб. Распределение дефектов по “Максвеллу-Больцману” (MB) (1), и по “Бозе-Эйнштейну” (BE)

(2) приводят к напряжениям течения вида:  $\sigma_{MB} \sim \sqrt{\varepsilon} \frac{b}{d} g(M) e^{-\frac{M(\varepsilon)b}{2d}}$ ,  $\sigma^{BE} \sim \sqrt{\varepsilon} \frac{b}{d} f(M) \cdot \left(e^{\frac{Mb}{d}} - 1\right)^{-\frac{1}{2}}$

при деформации  $\varepsilon$  с вполне определенными функциями  $g(M)$  и  $f(M)$ . Для дисперсионно упрочненного ПК агрегата (например, Cu с частицами  $\alpha$ -Fe с весом  $0 < U_{dis} < 1$ , и размерами зерен  $d$ ,  $d_{dis}$ ) напряжение течения (в частности, предел текучести при  $\varepsilon=0,002$ ) с учетом межзеренных границ (с нанопорами размерами  $d_p \leq 2$  нм) и распределением дефектов по BE

$$\sigma_{\Sigma dis}(d, d_{dis}, d_p, \varepsilon) = (1 - U_{dis}) \left\{ f_1 \sigma^{BE}(d) - f_2 \sigma^{BE}(d)|_{d=d_p} \right\} + U_{dis} \sigma_{dis}|_{d=d_{dis}} \quad (3)$$

(аналогично для распределения по MB) с весами  $f_1 = \left(1 + (d_p/d)\right)^{-3}$ ,  $f_2 = 1 - f_1$  - твердой фазы основного материала (Cu) и зернограничной области (нанопоры).

Для однофазной ( $f_1 = 1$ ,  $U_{dis} = 0$ ) одномодальной модели ПК агрегата с РДС, максимум предела текучести достигается при  $d_{max}^{BE} = 0,6275 Mb = 0,6275 d_{max}^{MB}$ , (со значениями  $\sigma_{MB}(d_{max}^{MB}) < \sigma_{BE}(d_{max}^{BE})$ ) и уменьшается при учете межзеренных границ.

При неизменном размере дисперсионных частиц оба распределения описывают процесс упрочнения-разупрочнения. Актуален вопрос: какая из функций распределения дефектов описывает закон Холла-Петча (3)? Требуется экспериментальная проверка альтернатив:

## гипотеза 1 (справедливость распределения дефектов по Бозе-Эйнштейну (2))

При дисперсионном упрочнении меди частицами железа  $d_{Fe} = (300 \div 350)$  нм точка упрочнения-разупрочнения (УР) наблюдается только для распределения BE в диапазоне  $d_{Cu} = (40 \div 50)$  нм при  $\sigma_{\Sigma dis} = (1,10 \div 1,15)$  ГПа. Разупрочнения Cu для распределения MB не наблюдается;

## гипотеза 2 (справедливость MB распределения)

Точка УР для распределения (1) появляется при размере  $d_{Fe} = (450 \div 500)$  нм и  $\sigma = (0,85 \div 0,95)$  ГПа в диапазоне  $d_{Cu} = (45 \div 75)$  нм

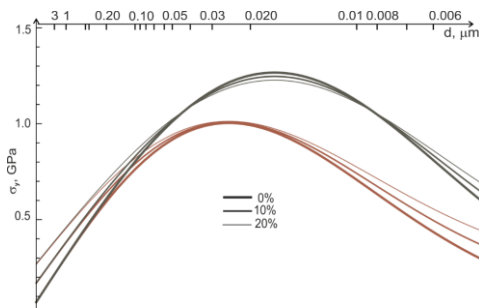


Рис. 1. Законы Холла-Петча для Cu-Fe по распределениям BE (сверху) и MB (снизу) для  $U_{dis}(Fe)=0;10;20\%$

## Литература

1. A. Reshetnyak, Statistical approach to flow stress and Hall-Petch law, arXiv:1803.08247[cond-mat.mtr-sci]
2. D. Cevizovic, A.A. Reshetnyak, Yu.P. Sharkeev, AIP Conference Proceedings.–2019. V. 2167. 020047
3. A.A. Reshetnyak, V.V. Shamshutdinova. AIP Conference Proceedings.–2023. V. 2899, 020122

## КОНТРОЛЬ ЧИСТОТЫ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Халилов Р. И., Колесниченко И. В.

*«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук ("ИМСС УрО РАН"), дом 1, улица Академика Королева, город Пермь, Россия*  
[khalilov@icmm.ru](mailto:khalilov@icmm.ru)

Целью настоящего исследования является разработка эффективного метода измерения физических свойств жидкометаллического теплоносителя, широко применяемого на атомных электростанциях на быстрых нейтронах. Традиционные системы контроля данных свойств интегрированы с системами очистки теплоносителя от примесей, воздействующих на его физические параметры, такие как теплопроводность и вязкость. Присутствие таких примесей может значительно изменить характеристики теплоносителя и, следовательно, привести к нежелательным последствиям в работе атомных реакторов.

В данном исследовании предлагается новый подход к решению этой проблемы путем анализа рабочих характеристик электромагнитного насоса, который является неотъемлемой частью систем очистки и контроля свойств жидкометаллического теплоносителя. Главное внимание уделяется анализу давления, генерируемого электромагнитным насосом, в зависимости от частоты тока, подаваемого в индуктор насоса. Предполагается, что эти параметры могут быть связаны с физическими характеристиками теплоносителя и, следовательно, могут служить показателями его состояния и чистоты.

Для подтверждения предложенной гипотезы было проведено математическое моделирование и экспериментальные исследования на конкретном электромагнитном насосе. Результаты показали, что существует зависимость между перепадом давления, развиваемым электромагнитным насосом, и электропроводностью рабочего тела при различных расходах. Более того, все установленные зависимости имели экстремумы, что указывает на оптимальные условия работы насоса.

Интересным результатом исследования явилось то, что при использовании галлиевой эвтектики в качестве рабочей жидкости значения перепада давления, рассчитанные теоретически и полученные экспериментально, совпадали. Это подтверждает применимость предложенного метода для оперативного и точного определения текущих значений электропроводности и, косвенно чистоты теплоносителя.

На основе полученных результатов предлагается создать методику контроля чистоты жидкометаллического теплоносителя, основанную на анализе характеристик электромагнитного насоса. Предложенный метод имеет большое значение для обеспечения безопасности и эффективности работы атомных электростанций на быстрых нейтронах, а также может быть применим в других областях, требующих мониторинга и контроля физических свойств жидких металлов.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОТЖИГА ХОЛОДНОКАТАННЫХ РУЛОНОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СЕРИИ 2XXX НА ПОЛУЧАЕМЫЙ РАЗМЕР ЗЕРНА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Исякаев К. Т. <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург

<sup>2</sup> ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», г. Каменск-Уральский  
[IsyakaevKT@kumw.ru](mailto:IsyakaevKT@kumw.ru)

Отраслевые стандарты [1, 2] по качеству обшивочных листов из алюминиевых сплавов серии 2xxx и 7xxx предъявляют высокие требования как к механическим свойствам и качеству поверхности, так и к размеру зерна в лакированном и основном слоях. Существующая технология изготовления листовой продукции не всегда позволяет добиться получения требуемых параметров, в том числе и по размеру зерна. На получаемые фактические значения размера зерна влияют процессы горячей и холодной деформации, а также процессы нагрева при окончательном отжиге до состояния поставки «М». С увеличением продолжительности времени нагрева при окончательном отжиге размер зерна возрастает с затуханием, т.к. после первичной рекристаллизации происходят процессы собирательной рекристаллизации, при которой скорость роста зерен постепенно снижается [3].

Цель работы заключалась в изучении влияния процессов нагрева слитков перед горячей прокаткой и корректировке режимов отжига холоднокатаных лакированных рулонов сплавов серии 2xxx для получения требуемого размера зерна <100 мкм.

Технологический цикл изготовления холоднокатаных лакированных листов включает в себя:

- горячую прокатку слитков с планшетами в рулон с толщиной 7,0 мм;
- холодная прокатка рулона до конечной толщины листа 1,5 мм с промежуточными отжигами;
- окончательный отжиг рулона до конечного состояния поставки «М», при котором происходит нагрев в садочной печи рулона большой массы (5 - 8 т) с длительным процессом нагрева (8 - 10 часов) до требуемой температуры.

В ходе работы в лабораторных условиях было исследовано изменение размера зерна в лакирующем слое при нагреве под горячую прокатку  $T_H = 468^{\circ}\text{C}$  с различным временем выдержки в печи от 30 минут до 12 часов. Время нагрева образцов до начала времени выдержки составило 12 часов (по практическим данным процесса нагрева в производственных условиях). Установлено, что увеличение времени выдержки не приводит к увеличению размера зерна (таблица 1).

Таблица 1- Влияние времени выдержки при 468°C на размер зерна в лакированном слое

Режим нагрева	Величина зерна, мкм	
	Поперечное направление	В плоскости прокатки
Без термообработки	<100	307÷332
Выдержка 30 минут	126	278
Выдержка 4 часа	132	318
Выдержка 8 часов	135	292
Выдержка 12 часов	127	339

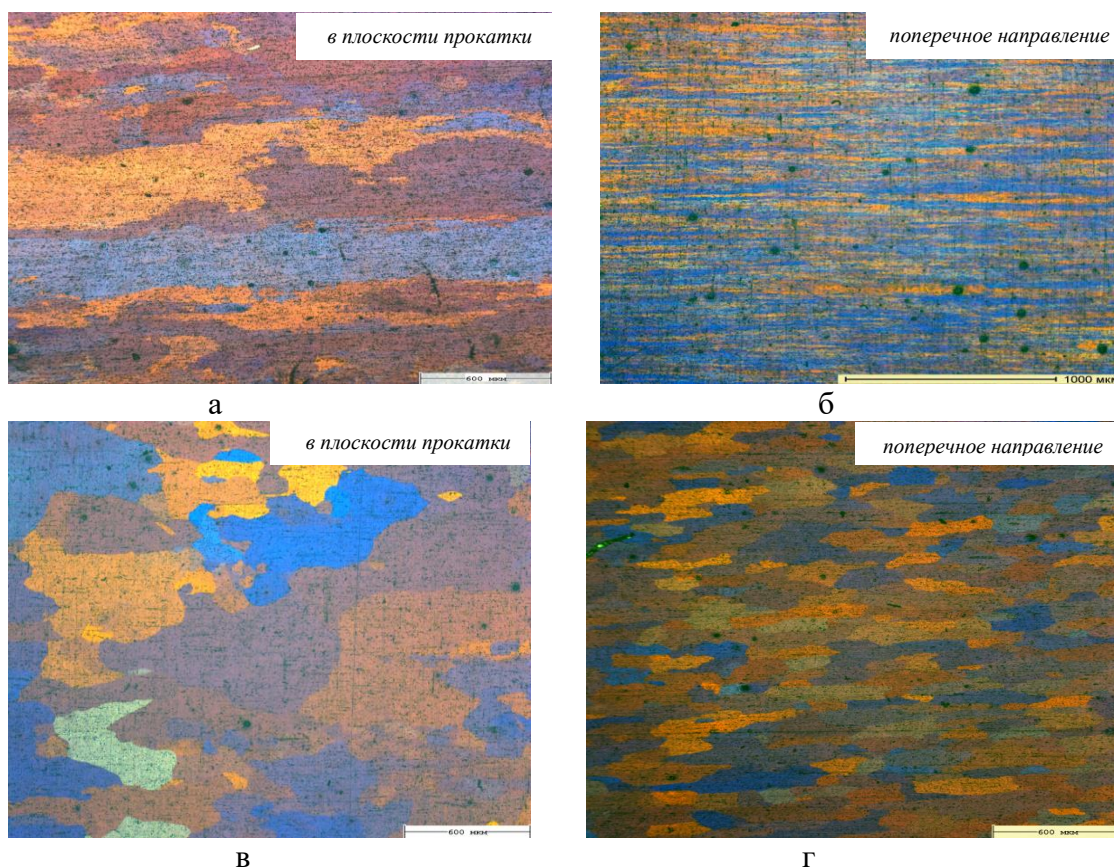


Рис. 1. Размер зерна в планшете при нагреве под горячую прокатку (x200):  
а, б – горячекатанное состояние; в, г - выдержка 12 ч.

Также для снижения негативного влияния длительного времени нагрева при окончательном отжиге холоднокатаных рулонов в садочных элеваторных печах, была проведена работа по использованию линии непрерывной термообработки (ЛНТО) для проведения скоростного отжига [4]. На ЛНТО нагрев полосы происходит во взвешенном состоянии при ее движении через печь со скоростью 20 м/мин. Единственным недостатком такого процесса является быстрое охлаждение полосы после выхода ее из печи, что не позволяет получить требуемые механические свойства. Для снижения прочностных свойств был применен окончательный отжиг в камерных печах. Результаты испытаний механических свойств, размера зерна и толщина лакирующего слоя приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение механических свойств, размера зерна и толщины лакирующего слоя в зависимости от предварительной обработки (толщина листа 1,0 мм)

Состояние образца	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Размер зерна, мкм		Толщина лакирующего слоя, %
			основа	лакирующий слой	
Холоднокатаное	<b>265-270</b>	<b>2,1-2,8</b>	$\leq 100$	$\leq 150$	5,2-5,4
Отжиг ЛНТО	<b>275</b>	18,0	$\leq 100$	$\leq 150$	4,3
Отжиг ЛНТО + окончательный отжиг	150-170	13,0-23,0	74-87	32-40	4,5-5,9
<b>Требование НД</b>	<b>145-225</b>	$\geq 10,0$	$\leq 100$	$\leq 150$	$\geq 4,0$

Исходя из полученных в работе результатов испытаний механических свойств и размера зерна, можно сделать вывод, что основными факторами, влияющим на размер зерна,

является скорость нагрева и время нахождения металла при температуре, которая находится в интервале первичной рекристаллизации.

Снижение температуры промежуточных и окончательных отжигов позволило уменьшить размер зерна, но полностью исключить несоответствия требованиям стандарта не позволило. При проведении холодной прокатки происходит процесс дробления зерен новыми высокоугловыми границами. Увеличение степени холодной деформации способствует дальнейшему измельчению микроструктуры при последующем отжиге за счет увеличения числа зародышей новых центров рекристаллизации.

Использование двух стадийного отжига с использованием на первой стадии высокоскоростного нагрева на ЛНТО позволило получить требуемые механические свойства и размер зерна.

Также отмечено, что на уменьшение величины рекристаллизованного зерна большую роль оказывает процесс высокотемпературной гомогенизации слитков перед горячей деформацией.

В дальнейшем планируется произвести исследования по изучению влияния режимов гомогенизации на получаемую микроструктуру и механические свойства готовых холоднокатаных листов.

#### Литература

1. ОСТ 1 90070-92 «Листы обшивочные из алюминиевых сплавов. Технические условия».
2. ОСТ 1 90246-77 «Листы конструкционные из алюминиевых сплавов».
3. Колобнев Н.И., Бер Л.Б., Цукров С.Л. «Термическая обработка деформируемых алюминиевых сплавов».
4. Цукров С.Л. Развитие линий непрерывной термической обработки лент из алюминиевых сплавов. *Технология легких сплавов*. 2018. № 4. С. 85–91.

Научное издание

XVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»  
сб. материалов (Екатеринбург, 27–31 мая 2024 г.)

Рекомендовано к изданию  
Ученым советом ИМАШ УрО РАН

Издается в авторской редакции  
Ответственный за выпуск *В. В. Привалова*  
Компьютерная верстка *Е. В. Фатыхова*

ISBN 978-5-6040873-4-3



9 785604 087343

Подписано в печать 27.05.2024 г. Формат 60×90 1/8.  
16, 46 п. л. Объем данных 6,76 МБ.

Оригинал-макет изготовлен в ИМАШ УрО РАН  
620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.  
Размещено в открытом доступе на сайте  
<https://www.imach.uran.ru/Conf2024/about/>