



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

Сборник материалов
(Екатеринбург, 18–22 мая 2026 г.)

Екатеринбург
ИМАШ УрО РАН
2026

УДК 620.17+620.16:620.18+620.19:620.179

ББК 34

Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» : сб. материалов (Екатеринбург, 18–22 мая 2026 г.). – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2026. – 190 с. – ISBN 978-5-6040873-6-7. – Режим доступа: <https://www.imach.uran.ru/conf2026/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», проводившихся с 2001 г.

Сборник адресован специалистам различных научных специальностей: механикам, физикам, материаловедом и т. д., а также представителям промышленности, что обусловлено междисциплинарным характером опубликованных докладов.

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

ISBN 978-5-6040873-6-7



9 785604 087367

© ИМАШ УрО РАН, 2026 г.
© Авторы, 2026 г.

Организаторы конференции:

МИНОБРНАУКИ России, УрО РАН, Российский комитет ESIS, ИМАШ УрО РАН, ИМЕТ УрО РАН, ИММ УрО РАН.

СПОНСОРЫ: ООО "НЬЮТОНС"

NEWTONS

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:**Сопредседатели оргкомитета:**

Сергей Смирнов, *Екатеринбург, Россия*,
Андрей Ремпель, *Екатеринбург, Россия*,
Николай Лукоянов, *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*
Матвеенко В. П., *Пермь, Россия*
Матвиенко Ю. Г., *Москва, Россия*
Мену А., *Касабланка, Марокко*
Миронов В. А., *Екатеринбург, 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 Просвиряков, *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*
Краус Е. И., *Новосибирск, 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*

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА НОВОГО СТАНДАРТА ASTM E3490 ПО ОЦЕНКЕ ВСТРОЕННОГО ПОРОГОВОГО РАЗМАХА КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ R. Sunder	19
ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ СПЛАВОВ ЛС59 И Д16 МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИН-СТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ К. И. Доронин, А. С. Голев	21
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПРИВЕРШИННОЙ ОБЛАСТИ ТРЕЩИНЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ, СОПРОВОЖДАЮЩЕМСЯ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ Л. В. Степанова, О. Н. Белова, Д.В. Чаплий	22
ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ, ПОЛУЧЕННОГО РОТАЦИОННОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ К. Д. Малыгина, Е. А. Путилова, Е. Ю. Приймак, И. С. Каманцев	23
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОСТОЯННЫХ НЕФТЕНАСЫЩЕННЫХ И ЭКСТРАГИРОВАННЫХ ИЗВЕСТНЯКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТРЕХОСНОЕ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ НАГРУЖЕНИЕ А. В. Зайцев, А. С. Поснов, В. В. Химуля, Н. И. Шевцов, В. И. Карев, Ю. Ф. Коваленко	24
ПРОГНОЗ ЭВОЛЮЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ И СПЛОШНОСТИ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ Ю. С. Быкова, Л. В. Степанова	25
СТРУКТУРА, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ С КАРБИДНЫМИ И ОКСИДНЫМИ ЧАСТИЦАМИ Т. С. Черкасова, С. В. Гладковский, С. В. Петрова, Р. А. Саврай, А. В. Протасов	26
АКУСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ И ДЕФЕКТОСКОПИЯ ПРУТКОВ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ О. В. Муравьева, А. Л. Владыкин, И. А. Растегаев	27
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО ОБЪЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА И. Е. Насенник, И. А. Батаев	28
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА, АРМИРОВАННОГО МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ К. В. Курашкин	29
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА – ЛЕ ШАТЕЛЬЕ В Al-Mg СПЛАВАХ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ Е. А. Чечулина, П. В. Трусов	30

СТАБИЛИЗАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И КИНЕТИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОРИСТОСТИ УУКМ ДЛЯ КОСТНЫХ ИМПЛАНТАТОВ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКЕ	31
Е. С. Разумовский, А. А. Чекалкин	
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В КОМПОЗИТАХ СИСТЕМЫ Ti-B-C ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	32
И. С. Герцель, А. Г. Маликов, А. Н. Шмаков	
УЧЕТ ДИССИПАЦИИ И ВЯЗКОСТИ В СКОРОСТЯХ ГРУППОВЫХ ВОЛН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТРУКТУРЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ ВЯЗКО-УПРУГИХ МОДЕЛЕЙ	33
Д. А. Третьяков, А. О. Арифиллина, В. С. Хоменко, Е. Д. Мешков, Д. Б. Куатхина	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОКАТЕ ПРИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИИ	34
Д. Б. Куатхина, Д. А. Третьяков	
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КЛИНОВИДНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА	35
В. В. Артемьев	
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ХРУПКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МИКРОСТРУКТУРАХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ	36
А. А. Ташкинов, В. Е. Шавшуков	
НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ОТВЕТСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ	37
И. В. Макаренко, Л. В. Макаренко	
МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕГО И СВЕРХ-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА 1565С	38
А. А. Вшивкова, А. И. Швейкин, Э. Р. Шарифуллина	
МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ В ОПЫТАХ НА ЦИКЛИЧЕСКОЕ КРУЧЕНИЕ	39
О. А. Староверов, С. В. Словииков, А. В. Ильиных, А. В. Лыкова, А. И. Мугатаров, А. В. Сивцева	
МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОДВИЖНОСТЬ ГРАНИЦ ЗЕРЕН	40
Д. С. Безверхий, М. Н. Балдин, Н. С. Кондратьев	
ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСЛОКАЦИЙ С ГРАНИЦАМИ ЗЕРЕН	41
К. А. Курмоярцева, П. В. Трусов	
КОМПОЗИТНЫЕ БАЛОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ЗАДАННОЙ ФОРМОЙ ПРОГИБА ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ	42
Н. А. Татусь, Д. Д. Власов	

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВАНИЯ ПО УДАРНО-ДИНАМИЧЕСКОМУ ОТКЛИКУ С АНАЛИЗОМ ЕДИНСТВЕННОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ	43
В. С. Выплавень, С. А. Бехер	
ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ МИКРТВЕРДОСТИ ПО ДЛИНЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ СЛИТКОВ, ФОРМИРУЕМЫХ СВС-ПРОЦЕССАМИ	44
С. Г. Жилин	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ МАРКИ 76ХФ С ВЫСОКИМИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМИ СВОЙСТВАМИ	45
И. А. Олифиренко, Т. Н. Осколкова, Е. В. Полевой	
НЕЙРОСЕТЕВАЯ NARX МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ С УЧЕТОМ ИСТОРИИ ДЕФОРМАЦИИ	46
А. С. Смирнов, В. С. Канакин, О. Ю. Муйземнек, Е. О. Смирнова	
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ В95-ТiС И НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	47
В. С. Канакин, А. С. Смирнов, В. П. Швейкин	
НОВЫЕ АЗОТСОДЕРЖАЩИЕ ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ	48
Н. Н. Соболева, А. В. Березовский, А. Н. Мушников, В. Е. Веселова, А. Н. Балин, М. А. Шолохов	
ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ Ni-SiC ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕ	49
А. В. Ганеев, А. С. Квятковская, Ю. Б. Сабурова, В. А. Белоногов, Р. Д. Еникеев, В. В. Астанин, С. О. Карабаев	
ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ПРИ МНОГООСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НЕРАВНОКОМПОНЕНТНОМ СЖАТИИ ПЕСЧАНИКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ЭЛЛИПСОИДА ЛАМЕ	51
И. А. Пантелеев, А. В. Зайцев, К. Б. Устинов, В. В. Химуля, Н. И. Шевцов, В. И. Карев, Ю. Ф. Коваленко	
К ВОПРОСУ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ ДЛЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ	52
А. Е. Аммосова, М. М. Копырин, А. К. Кычкин	
ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛА 08Х18Н9-09Г2С, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ	53
В. Е. Веселова, И. А. Веретенникова, К. В. Матвеева	
МИКРОСТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Ti50.2Ni49.8 ПРИ МНОГОКРАТНЫХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ И ПОСЛЕДУЮЩИХ ОТЖИГАХ	54
И. А. Хатипов, А. А. Чуракова	

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ТОЛЩИНЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА	55
И. Н. Одинцев, Т. П. Плугатарь	
ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С НЕРЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ СОТ	56
Т. П. Плугатарь, А. Н. Волков	
ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ОПОР ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ	57
Н. А. Татусь, Д. Д. Власов, А. Э. Поляков, А. Н. Полилов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН (СМП) ФОРМЫ СNMG	58
И. А. Веретенникова, А. А. Дейч	
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ	59
А. В. Ильиных	
ЭКСПРЕСС-МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ДЕФЕКТОВ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗЕ СИГНАЛОВ ВИБРОУСКОРЕНИЯ	60
А. В. Зайцев, В. А. Мильхин, М. М. Шобей, И. А. Судаков	
НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОНВЕЙЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ПО ДАННЫМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ	61
Г. С. Анисимов, Л. В. Степанова	
ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА И ЭЛЕКТРО-ШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ	62
И. Ю. Литовченко, С. А. Аккузин, Н. А. Полехина, В. В. Осипова, А. В. Ким, В. М. Чернов	
ПРЯМАЯ ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	63
Я. В. Вяткин, П. В. Трусов	
НЕУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ФТОРОПЛАСТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ГРАФЕНОВЫМ МАТЕРИАЛОМ	64
А. В. Зайцев, П. А. Лобанов, М. В. Банников, С. В. Уваров, Н. С. Лукьянов	
АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАВНОВЕСИИ ПОЛОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТЯЖЕЛОГО ОРТОТРОПНОГО ЦИЛИНДРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕОДНОРОДНОГО БОКОВОГО ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ	65
А. В. Зайцев, А. А. Фукалов	

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 3D-БИОПЕЧАТНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОЛЛАГЕНА ИЗ ТКАНЕЙ МОРСКИХ ОБИТАТЕЛЕЙ	66
Д. И. Спорышева, И. В. Виндокуров, М. А. Ташкинов, Ю. В. Куликова	
МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ КРЕПЛЕНИЯ КАНАТА НА СПЕКТР ЕГО ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ	67
К. Р. Муратов, А. Л. Ваганов, Р. А. Соколов, Н. Д. Бузолин, М. А. Осинцева	
УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПРЯМОМ ЛАЗЕРНОМ ВЫРАЩИВАНИИ	68
М. А. Гулов, И. С. Герцель, А. Г. Маликов, Е. И. Антонова	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ И МЕХАНИЧЕСКОГО ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ФИЛАМЕНТА ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛИКОЛЯ (РЕТ-G)	69
Р. Р. Исхужин, Ю. М. Кожевникова, М. В. Малых, Э. Р. Мухамедьянов, Ю. Г. Смирнов	
МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ГОРЯЧЕГО И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ	70
А. И. Швейкин, Э. Р. Шарифуллина, А. А. Вшивкова, К. А. Романов, Н. С. Кондратьев, В. Э. Вильдеман, С. А. Оглезнева	
АНИЗОТРОПИЯ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ДИФфуЗИОННО СВАРНЫХ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ	71
А. А. Саркеева	
МЕТОД РАСЧЕТА КИНЕМАТИКИ ЗВЕНЬЕВ ШАРНИРНО – РЫЧАЖНОГО ГЕНЕРАТОРА КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ БЛАГОНРАВОВА	72
А. В. Юркевич, В. А. Солдаткин, А. В. Терешин	
ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1441	73
И. Е. Витошкин, А. Г. Маликов, К. В. Захарченко, Е. В. Карпов	
НОВОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИАГРАММЫ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	74
Д. И. Вичужанин	
РАЗВИТИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ	75
М. Н. Балдин, П. В. Трусов	
ОПТИМИЗАЦИЯ БИОПОДОБНОЙ РЕШЕТЧАТОЙ СТРУКТУРЫ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА АНТЕННЫ	76
А. В. Азаров, Д. Д. Власов	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ AISI 420 ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ	77
В. П. Кузнецов, И. А. Воронцов	

ВЛИЯНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ СПЕЧЕННЫХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	78
А. Ф. Ильющенко, М. В. Лазарчик, А. Н. Роговой	
ИЗГИБНАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3Д-ПЕЧАТИ	79
О. Ю. Волкова, Д. Д. Власов	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ВАКУМНОЙ ИНФУЗИИ И ПРЯМОГО ПРЕССОВАНИЯ	80
А. А. Филиппов, К. Е. Первухин	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ	81
И. Г. Емельянов	
УПРОЧНЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ СЕВЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ	82
М. М. Сидоров, А. Ю. Михайлов	
ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CoCrFeNiAl(x)	83
Е. А. Путилова, К. Д. Малыгина	
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОРФОЛОГИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ЧАСТИЦ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Al-4,5 (La,Ce), ПОЛУЧЕННОГО ЛИТЬЕМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР	84
А. Е. Медведев, М. Ю. Мурашкин	
ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Fe, ПОЛУЧЕННЫХ ЛИТЬЕМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР	85
А. Е. Медведев, М. Ю. Мурашкин	
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ИСХОДНЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СВС-КОМПОЗИТОВ С ЖЕЛЕЗОНИКЕЛЕВОЙ МАТРИЦЕЙ	86
Н. Б. Пугачева, К. А. Костицина	
ВЛИЯНИЕ ПОСТОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ DMLS-ОБРАЗЦОВ СПЛАВА ВТ6 НА УСТАЛОСТНУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ	87
А. В. Корелин, Е. О. Параскивая, В. П. Кузнецов	
ВЛИЯНИЕ МНОГОПРОХОДНОГО НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 08X18N10	88
И. В. Татаринцев, А. В. Сергеев, В. П. Кузнецов	

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕТОКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ РЕЛЬСОВ	89
С. П. Шляхтенков, Д. Б. Некрасов, А. А. Попков, А. Ю. Коровченко, М. А. Гуляев	
БИОПОДОБНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И 3D-ПЕЧАТЬ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	90
А. Э. Поляков, О. Ю. Волкова	
РОЛЬ МИКРОГЕОМЕТРИИ В ОЦЕНКЕ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАР ТРЕНИЯ	91
И. Г. Горячева	
РАЗРАБОТКА ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ДЛЯ РАБОТЫ В ВАКУУМЕ И ИНЕРТНЫХ СРЕДАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА	92
Е. В. Харанжевский, А. Г. Ипатов, А. В. Макаров	
АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПОЗИТНЫХ БАЛОК ПРИ ИЗГИБЕ	94
Т. Д. Баландин, Д. Д. Власов, Д. В. Чернов	
ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ КООРДИНАТНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	95
Т. Д. Баландин, Д. В. Чернов	
ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСКОПИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ КЛЕТОК ПРИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЯХ И В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ	96
О. Б. Наймарк	
ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЗОНЫ МАКСИМАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ УГЛЕПЛАСТИКА ВДОЛЬ ОБРАЗЦА ПРИ ПОВТОРНОМ РАСТЯЖЕНИИ	97
П. Б. Северов	
МЕХАНИКА ПОЛИМЕРНЫХ 3D-ПЕЧАТНЫХ ГИЛЬЗ ЭКЗОПРОТЕЗОВ С ЛОКАЛЬНЫМ АРМИРОВАНИЕМ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ	98
Д. А. Долгих, М. А. Ташкинов	
ПОДБОР СОСТАВА ШИХТЫ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ЗАДАННОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА	99
А. В. Мажарин, А. Р. Михно, И. А. Панченко, С. В. Коновалов	
РАЗРАБОТКА СУРРОГАТНЫХ МОДЕЛЕЙ НА БАЗЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ: ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОСЕТИ LIMITED MINIMUM STATE CELLS	100
П. А. Гладких, А. И. Швейкин	
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ZrO₂	101
Т. А. Симонова, А. Э. Трохачева, Н. Б. Пугачева	

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ПОСТОБРАБОТКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ZrO_2	102
Н. Б. Пугачева, А. Э. Трохачева	
ВЛИЯНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКАФФОЛДОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЙ ОТКЛИК СИСТЕМЫ «КОСТЬ–ИМПЛАНТАТ»	103
В. М. Затонская, Н. В. Еленская, И. А. Пащенко, М. А. Ташкинов	
МНОГОСЛОЙНЫЕ СДВИГОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧЕ НУССЕЛЬТА-КУЭТТА-ПУАЗЕЙЛЯ	104
К. В. Губарева, Е. Ю. Просвиряков	
ТЕРМОГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ТОНКОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ	105
К. В. Губарева, Е. Ю. Просвиряков	
РЕЛАКСАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ ПРИ РАВНОМЕРНОЙ ПРОДУВКЕ	106
К. В. Губарева, Е. Ю. Просвиряков	
НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ПРОНИЦАЕМОМ КАНАЛЕ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПЕРЕПАДЕ ДАВЛЕНИЯ	107
К. В. Губарева, Е. Ю. Просвиряков	
ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЗАДАЧИ С ДИССИПАЦИЕЙ В ПЛОСКОМ СЛОЕ	108
К. В. Губарева, Е. Ю. Просвиряков	
СТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ КУЭТТА С АСИММЕТРИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ НА ГРАНИЦАХ ПРОНИЦАЕМОГО КАНАЛА	109
К. В. Губарева, Е. Ю. Просвиряков	
НЕОДНОРОДНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПУАЗЕЙЛЯ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ЖИДКОСТИ В НАКЛОННОМ СЛОЕ	110
Е. Ю. Просвиряков, б, А. В. Янковская	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ SMART-МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ, ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ.	111
В. П. Матвеев, А. О. Каменских, С. В. Лекомцев, Г. С. Сероваев	
ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ	112
О. А. Плехов, А. Ю. Изюмова, М. Л. Бартоломей, А. Н. Вшивков	
СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 09Г2С ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ	113
Ю. В. Худорожкова, С. В. Буров, А. М. Поволоцкая, Д. И. Вичужанин	
ВЗАИМОСВЯЗЬ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ И ПОВОДОК ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ	114
С. В. Буров, Ю. В. Худорожкова	
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАГНИТОСТРИКЦИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ	115
А. Н. Мушников	

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА Zn-0,47Li	116
Д. Е. Винокуров, Д. Ю. Распоиенко, С. В. Афанасьев, Е. С. Белослудцева, Д. И. Давыдов	
ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Ce-Fe-Ni-Zr, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЛП	117
С. А. Кунавин, К. О. Базалеева, Ю. Ю. Понкратова, И. И. Бинков	
МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	118
Н. С. Кондратьев, К. А. Романов, Д. С. Безверхий, М. Н. Балдин, Э. Р. Шарифуллина, А. И. Швейкин, К. В. Остапович, А. Н. Подседерцев	
К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ В СТРУКТУРЕ КОМПОЗИТНЫХ ТРИБОМАТЕРИАЛОВ	119
П. Г. Пыриков	
ОСОБЕННОСТИ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБНОЙ ПРОДУКЦИИ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО СПЛАВА 02ХН30МДБ (ЭК-77) С ПРИМЕНЕНИЕМ ТПА 8-16"	120
Я. И. Космацкий, И. Н. Веселов, В. Н. Еремин, Н. Ю. Смолин, К. Ю. Яковлева, П. Н. Нифантьев, Н. В. Фокин	
ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА Cu/TiC+TiB₂ ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	121
Н. Б. Пугачева, Т. М. Крючкова, Д. И. Крючков	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОЛИКАРБОНАТА И ПММА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ С ПРОВЕРКОЙ РЕЗУЛЬТАТОВ СИНХРОТРОННОЙ РЕНТГЕНОГРАФИЕЙ	122
А. Е. Бузюркин	
ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА СЕТЧАТЫХ ПРЕГРАД, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ	123
А. Н. Петрова, И. Г. Бродова, А. И. Кленов, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Гармашев, А. В. Долматов	
ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ЖЕЛЕЗОАЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АЛЮМОТЕРМИИ	124
В. А. Худякова	
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАДИЙНОСТИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТОДАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ	125
М. В. Банников, С. В. Уваров, А. С. Никитюк, А. М. Соколов, А. В. Аристова	
ПРЯМОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	126
А. А. Голышев, А. Г. Маликов, И. Е. Витошкин, И. С. Герцель	

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗМЕРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ В ЗОНАХ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛОПАСТЕЙ КОЛЕС ГЭС	127
Е. В. Анискович	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СКАФФОЛДОВ ДЛЯ ЗАМЕЩЕНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР	128
Ю. В. Пирогова, В. М. Затонская, Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов	
ЭВОЛЮЦИЯ ВЕКТОРИАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТАНТ УПРУГОСТИ Ni-НАНОКОМПОЗИТОВ	129
С. А. Берестова, К. В. Серков	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДЖОНСОНА-КУКА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК6, ПОЛУЧЕННОГО АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ	130
А. И. Кленов, И. Г. Бродова, А. Н. Петрова, Н. Н. Тулаева, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Гармашев	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА МЕТОДОМ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОПКИНСОНА	131
Е. А. Черногузова, А. И. Клёнов, Д. Т. Юсупов, Е. Б. Смирнов, И. Г. Галиуллин, К. М. Просвирнин, А. В. Сарафанников, М. В. Малых	
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОЛНОВОГО РЕДУКТОРА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ	133
И. К. Фарукшин, О. О. Сиверин, Е. Е. Алексеев, В. Д. Саломонов, В. Д. Афтенко	
УЧЕТ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ЧАСТИЦ В РАМКАХ МНОГОУРОВНЕВОЙ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВОВ	134
Э. Р. Шарифуллина, А. И. Швейкин, П. В. Трусов	
ЦИФРОВОЕ МНОГОУРОВНЕВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРУТКА ИЗ СТАЛИ 40	135
К. А. Романов, Н. С. Кондратьев, А. И. Швейкин	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРОТУРБИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРИИ	136
С. В. Маслов	
ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA	137
А. А. Каменских, Ю. И. Лесникова, А. Н. Труфанов	
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗНОГО ХАРАКТЕРА И УРОВНЯ ТЕРМОСИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФРИКЦИОННОЕ КОНТАКТНОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОПОРНОЙ ЧАСТИ	138
А. П. Богданова, А. А. Каменских, Ю. О. Носов	

К ВЫБОРУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ (CU-FE, NI-TI) ИЗ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ ОТ РАЗМЕРА ЗЕРЕН ПРИ ДИСПЕРСИОННОМ УПРОЧНЕНИИ-РАЗУПРОЧНЕНИИ	139
А. А. Решетняк, В. В. Шамшутдинова	
ИЗНОС СЛОИСТОГО СТАЛЬНОГО КОМПОЗИТА, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ДАВЛЕНИЕМ	141
М. М. Сибиряков, А. М. Иванов, Н. Ф. Стручков	
КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ С СВЕТОПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИТАМИ ПРИ РЕСТАВРАЦИИ КЛИНОВИДНОГО ДЕФЕКТА	142
А. А. Каменских, С. С. Седельникова	
МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ НЕСПЕЧЕННЫХ ПРЕССОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА	143
П. А. Поляков	
ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ И ТЕРМОМЕХАНИКА ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ ПОСЛЕ ОТВЕРЖДЕНИЯ	144
А. А. Каменских, В. И. Струкова	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	145
О. А. Староверов, В. Э. Вильдеман	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СЛОИСТЫХ, ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРЕГРАД	146
А. Е. Краус	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЛЬНИКОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА	147
П. О. Буковский, Д. В. Демченко	
ДИАГНОСТИКА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ, РИСК-АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	148
Н. А. Махутов, В. В. Москвичев, Н. А. Чернякова	
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СЕЙСМОСТОЙКИХ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ	149
А. А. Каменских, Ю. И. Лесникова, А. Р. Мухаметшин, Ю. О. Носов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГРАММ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УРОВНЕ НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦА ИЗ СТАЛИ 17Г1С	150
Р. С. Ахметханов	
ТЕПЛОВАЯ ДИАГНОСТИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ	151
Р. С. Ахметханов	

МЕТОД УТОЧНЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО ИХ ОБЪЕМУ	152
С. Т. Калашников, Г. Ф. Костин, В. А. Тюменцев, Р. К. Швалева	
СОВРЕМЕННЫЕ ГИБРИДНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ МОРСКОГО БИООБРАСТАНИЯ	153
Т. Д. Кугрышева, В. А. Винокуров	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ АРМОЦЕМЕНТНЫХ ЭКРАНОВ ПРИ УДАРЕ	154
С. П. Батуев, П. А. Радченко, А. В. Радченко	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА 3D-СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ НА АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ	155
А. Ф. Ильющенко, А. И. Лецко, Т. А. Николайчук	
ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ФОСФОГИПСА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ	156
М. В. Прожега, Н. Н. Смирнов, П. Н. Волченкова	
ЗАДАЧА МАРШРУТИЗАЦИИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМ РЕСУРСОМ; ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ ДЕКОМПОЗИЦИИ	157
А. Г. Ченцова, П. А. Ченцов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ СТЕКЛОЭПОКСИДНОГО МАТЕРИАЛА	158
М. В. Прожега, Н. Н. Смирнов, И. А. Лешаков, П. Н. Волченкова	
ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОГО МЕТАЛЛА ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ	159
П. В. Лаврентьева, С. А. Баранникова	
КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛИЗОВАННОГО РАЗРУШЕНИЯ В КВАЗИХРУПКОМ МАТЕРИАЛЕ С МНОГОУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ	160
И. Е. Шиповский	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КАК РЕЗУЛЬТАТА ПРОЦЕССОВ В ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЕ МАТЕРИАЛА	161
М. А. Соковиков, М. Ю. Симонов, В. В. Чудинов, В. А. Оборин, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк	
СВЯЗЬ ВНУТРЕННЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ МЕТАМАТЕРИАЛА С ЕГО ДЕФОРМАЦИОННЫМ ОТКЛИКОМ	162
Л. Р. Ахметшин, Ч. Исмаилова	
ЭФФЕКТИВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА В ОБРАЗЦЕ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА С НЕПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ	164
К. Иохим, Ч. Исмаилова	

РОЛЬ ОКСИДА ВИСМУТА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЛЕГИРОВАНИИ СТАЛИ В ДОСТИЖЕНИИ СВЕРХНИЗКОГО ТРЕНИЯ И ИЗНОСА	166
А. В. Макаров, Е. В. Харанжевский, А. С. Широбокова, А. Г. Ипатов, Е. Г. Волкова, Ф. З. Гильмутдинов	
ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ОСАДКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Zn-Mg-Cu	167
Э. И. Бурибаев, В. П. Швейкин, Д. И. Крючков	
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА 09Г2С-10Х18Н10 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ	168
В. Е. Веселова, С. Д. Иванова, И. С. Каманцев, Е. А. Путилова	
ЕДИНЫЙ МЕХАНИЗМ ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛО-, И МНОГО-ЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ	169
А. П. Владимиров	
РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ	170
М. А. Шолохов	
РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ РЕЛЬСОВ МЕТОДАМИ ТЕНЗОМЕТРИИ	171
А. А. Игумнов, Т. В. Игумнова, А. А. Попков, М. М. Савиновский	
ГИБРИДНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА НЕИСПРАВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА: ИНТЕГРАЦИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	172
Т. Г. Кормин	
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТВЕРДИТЕЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	173
С. В. Смирнов, И. А. Веретенникова, А. В. Пестов, В. А. Осипова	
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ЭД-20	174
А. А. Трофимов, С. В. Смирнов, А. П. Сафронов, К. О. Ильинова	
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg-Si и Al-Cu-Mg	175
Н. А. Калинина	
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РЕСУРСА УЗЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО И ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ОТКАЗОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РОБОТА	176
Т. Г. Кормин, С. А. Берестова	

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КЛИНОВИДНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА	177
В. В. Артемьев	
ИНИЦИАЦИЯ ХРУПКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО АРМИРОВАННОМ МАТЕРИАЛЕ	178
В. Е. Шавшуков, Е. С. Разумовский	
ВЛИЯНИЕ ПОВОРОТА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЯЧЕЕК НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ СЖАТИИ	180
М. П. Варыгина	
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПРИВЕРШИННОЙ ОБЛАСТИ ТРЕЩИНЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ, СОПРОВОЖДАЮЩЕМСЯ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ	181
Л. В. Степанова, О. Н. Белова, Д. В. Чаплий	
ПРОГРАММА ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ РЕАКЦИЯ-ДИФфуЗИЯ ПРИ ЗАДАННЫХ НУЛЕВЫХ ФРОНТАХ ДЛЯ ДВУХ ИСКОМЫХ ФУНКЦИЙ	182
Л. Ф. Спевак, О. А. Нефедова	
ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ ГЕОМАТЕРИАЛОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ: НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ	183
И. Ж. Бунин, А. Н. Кочанов	
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПЕЧАТИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ АДДИТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ	184
И. С. Никитин, А. О. Семенюк, Р. С. Черниченко, Е. А. Воропаева, Н. Р. Дудова, А. А. Калинин, С. Ю. Миронов	
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛИ ИЗ ЯЧЕЕК НА ОСНОВЕ «ПРИМИТИВА ШВАРЦА»	185
Е. В. Москвичев	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ СВЕРХТОНКОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ НА КРЕМНИЕВОМ ОСНОВАНИИ	186
Л. В. Степанова, К. А. Буланова	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО СТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА У8+08Х18 ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ЧИСТОГО ПЛОСКОГО ИЗГИБА	187
А. А. Минаков, А. И. Плохих	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ СВЕРХТОНКОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ НА КРЕМНИЕВОМ ОСНОВАНИИ	188
Л. В. Степанова, К. А. Буланова	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ	189
Н. В. Дмитриев	

**КИНЕТИКА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ
ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ
РАЗНООРИЕНТИРОВАННЫХ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКИХ
МАЛОЦИКЛОВЫХ ТРЕЩИН**

И. В. Макаренко, Л. В. Макаренко

190

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА НОВОГО СТАНДАРТА ASTM E3490 ПО ОЦЕНКЕ ВСТРОЕННОГО ПОРОГОВОГО РАЗМАХА КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

R. Sunder

BISS Labs, ITW-India (P) Ltd, Bangalore, India

Расчет деталей машин и элементов конструкций как на безопасную долговечность, так и на период между осмотрами требует достоверной оценки скорости роста трещины при действиях эксплуатационного спектра нагрузок на ранней стадии ее роста. Малые трещины как правило возникают у концентраторов напряжения. Они открыты воздействию всего размаха приложенных нагрузок, в том числе и при наличии сжимающей составляющей.

Исходя из природы усталости, кончик малой трещины сходен самому концентратору, от которого он продвигается. Можно предполагать, он будет ощущать влияние как асимметрии цикла, так и предыстории нагружения аналогично самому концентратору напряжения.

Пороговый размах коэффициента интенсивности напряжения, ΔK_{th} , определяемый стандартными методами типа ASTM E647 не может отражать истинные пороговые условия роста трещин на ранней стадии их развития. Методика его оценки предполагает постепенное снижение ΔK до достижения пороговых условий, поддерживая при этом заданную асимметрию цикла. Опыт показывает, что при асимметрии примерно 0,5:0,6, поверхности излома за кончиком трещины касаются друг о друга на протяжении доли приложенного размаха цикла, при чем, доля такого «закрытия трещины» растет с снижением асимметрии цикла.

Методика оценки встроенного (истинного), ΔK_{th} с обозначением $\Delta K_{th,i}$ по ASTM E3490 позволяет оценить зависимость между $\Delta K_{th,i}$ и местным расчетным остаточным напряжением у кончика трещины, σ^* . Данная зависимость позволяет рассчитать влияние как асимметрии цикла, так и предыстории нагружения на

сопротивление удлинению как длинной усталостной трещины, так и малых трещин у концентратора.

Серия контрольных экспериментов подтвердила преувеличенные в 2-3 раза показания ΔK_{th} по отношению к $\Delta K_{th,i}$. С другой стороны, испытания на Waspaloy при 650°C подтверждают способность зависимости $\Delta K_{th,i}$ от σ^* достоверно описать влияние предыстории нагружения на близ-пороговую скорость роста трещины. В 2025-ом году были проведены школы в Индии и России по ускоренному расчету на остаточную долговечность при случайном нагружении с использованием зависимости $\Delta K_{th,i}$ от σ^* . В декабре 2026-ого года совместно с конференцией SICE2026 и ASTM, на базе лаборатории БИСС и Индийского института науки планируется однодневная школа по самой методике. Сам стандарт ASTM E3490 прошел финальное единогласное баллотирование комитета ASTM E08 и находится на стадии публикации.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ СПЛАВОВ ЛС59 И Д16 МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

К. И. Доронин^а, А. С. Голев^б

^а ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», 199106, 21-я линия В.О.,
2, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

^б ООО «Константа», 198097, Огородный переулок, 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

При контроле качества материалов определяют его пластические и упругие свойства. Поведение материала при деформации в упругом диапазоне чаще всего характеризуется модулем упругости, который определяется по разрушающим механическим испытаниям при растяжении стандартных образцов.

Альтернативой механическим испытаниям является применение методов индентирования, позволяющих определять модуль упругости. В соответствии с ГОСТ Р 56474 динамический модуль упругости, определяемый в процессе испытаний, является аналогом нормального модуля упругости, однако подтверждение их соответствия не существует. Также нет средств измерений в виде эталонных мер модуля упругости. Существует необходимость разработки методических основ создания эталонных мер модуля упругости для данного метода.

Для испытаний были использованы заготовки сплавов ЛС59 и Д16 в виде прутков. Из одной заготовки изготавливались образцы двух видов: образцы для растяжения и цилиндрические меры для испытаний методом динамического инструментально индентирования (ДИИ). Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения метода ДИИ для оценки модуля упругости.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПРИВЕРШИННОЙ ОБЛАСТИ ТРЕЩИНЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ, СОПРОВОЖДАЮЩЕМСЯ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ

Л. В. Степанова, О. Н. Белова, Д. В. Чаплий

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086,

Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

Существующие аналитические подходы не позволяют полностью описать эволюцию полей напряжений и деформаций у вершины трещины в сложных и ответственных элементах конструкций при ползучести с учётом накопления повреждения материала. Разработка верифицированных численных моделей, воспроизводящих зарождение и рост микродефектов в этой области, открывает путь к созданию физически обоснованных критериев разрушения. В связи с этим численное моделирование процессов накопления повреждений вблизи вершины трещины в условиях ползучести остаётся актуальной задачей современной теории деформируемых твёрдых тел, особенно применительно к длительно работающим высокотемпературным установкам. Для симуляции и прогнозирования кинетики накопления повреждений в программную реализацию метода конечных элементов встроено эволюционное уравнение Качанова-Работнова с внесением скалярной меры поврежденности в определяющие соотношения установившейся ползучести, что позволило выявить диапазоны асимптотического поведения полей сплошности и напряжений: выделены интервалы, на которых справедливы различные асимптотики – асимптотическое поведение ближнего поля, промежуточную асимптотику и асимптотику дальнего поля. Численные расчеты проведены для широкого ряда металлов и сплавов. Проведенные расчеты для времен от сотен часов до десятков лет продемонстрировали свойство автомодельности решения и позволили найти автомодельную структуру решения, что открывает возможности прогностических оценок развития поврежденности в элементах конструкций.

Авторы благодарят РФН, проект № 25 - 21- 00272.

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ, ПОЛУЧЕННОГО РОТАЦИОННОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

К. Д. Малыгина^а, Е. А. Путилова^а, Е. Ю. Приймак^{б, в}, И. С. Каманцев^а

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

^б АО «Завод бурового оборудования», 460026, пр. Победы, 118, г. Оренбург, Российская Федерация

^в Оренбургский государственный университет, 460018, пр. Победы, 13, г. Оренбург, Российская Федерация

В данной работе методом дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) исследована эволюция структуры в зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) сварного соединения биметаллической трубы 32Г2С – 08Х18Н10Т, полученного ротационной сваркой трением (РСТ). Показано, что в процессе сварки реализуется комбинированное действие двух механизмов рекристаллизации. В высокодеформированных приконтактных объёмах преобладает непрерывная динамическая рекристаллизация, сопровождающаяся дроблением исходных зёрен, накоплением малоугловых границ (2–15°) и формированием развитой субструктуры внутри зёрен. Одновременно фиксируются участки с локальной миграцией границ, характерной для прерывистой рекристаллизации, что приводит к появлению отдельных аномально выросших зёрен на фоне мелкозернистой матрицы. Вследствие этого приконтактная область отличается резкой структурной неоднородностью – разнотернистостью с вариацией размеров зёрен от 5 до 40 мкм. По мере удаления от линии стыка, где интенсивность термомеханического воздействия снижается, процессы возврата и рекристаллизации протекают более полно. В периферийных участках ЗТМВ формируется однородная мелкозернистая структура, средний размер зёрен в которой не превышает аналогичного показателя в основном металле. Установленные закономерности свидетельствуют о градиентном характере структуры при ротационной сварке трением.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОСТОЯННЫХ НЕФТЕНАСЫЩЕННЫХ И ЭКСТРАГИРОВАННЫХ ИЗВЕСТНЯКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТРЕХОСНОЕ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ НАГРУЖЕНИЕ

А. В. Зайцев^{а, *}, А. С. Поснов^{а, **}, В. В. Химуля^б, Н. И. Шевцов^б, В. И. Карев^б,
Ю. Ф. Коваленко^б

^а Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

^б Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

* a-zaitsev@mail.ru, ** alekposnov@yandex.ru

Проведена обработка результатов испытаний кубических образцов высоко- и низкопористых нефтенасыщенных трансверсально-изотропных известняков одного из месторождений Пермского края. Эксперименты проведены на Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН).

Применялось два способа определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона фиктивного изотропного тела. В первом способе для исходной недоопределенной системы трех уравнений (обобщенный закон Гука) записывались две системы, из решения которых находились две пары искомых модулей. Второй способ связан с решением двух уравнений, записанных в инвариантном виде, относительно единственной пары искомых модулей сдвига и объемного сжатия. Найденные деформационные постоянные фиктивного изотропного тела, подставленные в системы из трех уравнений, позволяют вычислить оставшиеся три модуля. Проводилась проверка удовлетворения значений постоянных условиям положительности собственных значений оператора упругости. Пятая характеристика – продольный модуль сдвига не может быть найдена из-за отсутствия сдвига в программе нагружения для ИСТНН. Для ее определения можно воспользоваться ограничениями для параметров анизотропии.

Проведена оценка влияния предварительной экстракции на деформационные свойства известняков. Показано существенное влияние органической фазы на значения модулей Юнга и коэффициентов Пуассона для различных давлений обжатия. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 25–21–00442).

ПРОГНОЗ ЭВОЛЮЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ И СПЛОШНОСТИ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Ю. С. Быкова, Л. В. Степанова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086,
Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

Конечно-элементное моделирование связанной задачи ползучести с учетом накопления повреждений у вершины трещины требует значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает его применение для оперативной оценки остаточного ресурса элементов конструкций. В работе на основе пользовательской подпрограммы UMAT выполнен цикл расчётов, результаты которых позволили установить характер асимптотического изменения полей напряжений и сплошности по мере удаления от вершины дефекта (для ближней, промежуточной и дальней областей) и установить свойство автомодельности связанной задачи: временные срезы полей напряжений и параметра сплошности после соответствующего масштабирования сводятся к единой универсальной кривой. На основе этого свойства предложен вычислительный метод (реализован на Python с NumPy/SciPy), который по данным нескольких расчётных моментов времени строит универсальную функцию самоподобия, позволяющую восстанавливать поля напряжений и сплошности для любого момента времени без дополнительных конечно-элементных расчётов. Метод включает формирование данных по нескольким временным срезам, переход в автомодельные координаты и отдельную аппроксимацию точек полиномом третьей степени для ближней и дальней зон у вершины трещины.

Проверка метода на независимых временных срезах показала среднюю ошибку предсказания напряжений и сплошности не более 3% относительно прямого конечно-элементного расчёта. Вычислительные затраты на предсказание – доли секунды против часов при полноценном моделировании.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, шифр проекта FSSS-2026-0009.

СТРУКТУРА, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ С КАРБИДНЫМИ И ОКСИДНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Т. С. Черкасова^а, С. В. Гладковский^а, С. В. Петрова^а, Р. А. Саврай^а,
А. В. Протасов^б

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

^б Институт физики металлов УрО РАН, 620108, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

Изучены структура, физико-механические и трибологические свойства широко используемых в различных отраслях промышленности алюмоматричных композитов (АМК) состава $Al+25\%B_4C$, $Al+25\%SiC$, $Al+25\%Al_2O_3$ и $Al+12,5\%B_4C+12,5\%SiC$, полученных методами горячего прессования (ГП) и искрового плазменного спекания (ИПС). Определено влияние состава и способа получения композитов, а также дисперсности армирующих частиц на структуру, плотность, микротвердость, абразивную износостойкость и строение поверхности износа АМК. Установлено, что для метода ИПС наиболее высокая микротвердость композитов ($HV_{0,05} = 43-55$) достигалась при введении крупноразмерных частиц SiC ($d = 90-150$ мкм) и Al_2O_3 ($d = 80-250$ мкм), а для метода ГП повышенные значения $HV_{0,05} = 44-45$ наблюдались при добавлении мелкодисперсных частиц B_4C ($d = 5-13$ мкм) и Al_2O_3 ($d = 4-8$ мкм). При этом вне зависимости от метода получения АМК наиболее высокая абразивная износостойкость получена при ведении крупноразмерных частиц карбида кремния и оксида алюминия. Показано, что процесс изнашивания композита $Al+25\%SiC$ с наибольшей износостойкостью развивается преимущественно по абразивному механизму, а наименее износостойкого АМК $Al+25\%B_4C$ по адгезионному механизму.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 124020600045-0.

АКУСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ И ДЕФЕКТОСКОПИЯ ПРУТКОВ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

О. В. Муравьева^{а, б}, А. Л. Владыкин^а, И. А. Растегаев^в

^а Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, ул. Студенческая, 7,
г. Ижевск, Российская Федерация

^б Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, 426067, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34,
г. Ижевск, Российская Федерация

^в Тольяттинский государственный университет, 445020, ул. Белорусская, 14, г. Тольятти, Российская Федерация

Исследование направлено на решение проблемы оценки структурного состояния и выявление дефектных зон в не магнитных прутках перспективных магниевых сплавов систем Mg-Zn-Y-Gd и Mg-Ca-Zn с использованием нескольких подходов акустических измерений.

Акустические измерения выполнены эхо-импульсным методом с применением проходных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей поперечных волн и пьезопреобразователей продольных волн на основе поливинилденфторидной пьезопленки. По полученным значениям скоростей продольных и поперечных волн рассчитаны динамические упругие модули. Для образцов с различным химическим составом и микроструктурой установлена высокая корреляция между содержанием вторичной X-фазы сплава Mg-Zn-Y-Gd и исследованными акустическими характеристиками. Также исследован волноводный акустический контроль с применением крутильных и стержневых волн и преобразователей с сухим точечным контактом. Обнаруженные зоны неоднородности подтверждены с использованием ЭМА зеркально-теневого метода на многократных отражениях.

Полученные результаты демонстрируют высокую информативность акустических методов для оценки структуры и выявления дефектов в магниевых сплавах исследованных систем легирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FZZN-2025-0003 с использованием УНУ (рег. номер: 586308).

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО ОБЪЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА

И. Е. Насенник, И. А. Батаев

Новосибирский государственный технический университет, 630073, пр. Карла Маркса, 20, г. Новосибирск,
Российская Федерация

В настоящее время многими научными коллективами со всего мира исследуется относительно новый класс материалов, обладающих комплексом перспективных свойств – высокоэнтропийные объемные металлические стекла (ВЭОМС).

В работе были проанализированы механические свойства и трибологические характеристики ВЭОМС $Zr_{35}Hf_{17,5}Ti_{5,5}Al_{12,5}Co_{7,5}Ni_{12}Cu_{10}$. Термически обработанного при температурах от 370°C до 460°C (с шагом в 30°C). Температура стеклования данного металлического стекла составляет 450°C. Трибологические испытания проводились по схеме шар-плоскость, контртелом выступал шарик из стали ШХ15. Величина прикладываемой нагрузки – 25 Н. Исследования проводились в течение 1800 секунд с частотой 5 Гц, таким образом совокупный пройденный путь за время испытания составил 1000 метров.

В результате испытаний было заключено, что термическая обработка при температуре 370°C позволяет сохранить коэффициент трения на уровне литого образца, при этом уменьшая объемные потери материала. У образцов, отожженных при более высоких температурах, наблюдалось выкрашивание материала с поверхности дорожки и ухудшались трибологические характеристики.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА, АРМИРОВАННОГО МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

К. В. Курашкин

Институт прикладной физики РАН, 603024, ул. Белинского, 85, г. Нижний Новгород, Российская Федерация
k.kurashkin@ipfran.ru, kurashkinkv@yandex.ru

Исследована взаимосвязь между структурными характеристиками литого алюмоматричного композита, армированного многостенными углеродными нанотрубками, и параметрами распространения ультразвуковых сдвиговых волн, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем. Представлены результаты измерений в образцах композита скорости и затухания с помощью широкополосного электромагнитно-акустического преобразователя, возбуждающего и принимающего радиально поляризованные сдвиговые волны, распространяющиеся перпендикулярно поверхности. Экспериментально установлено, что затухание сдвиговой волны прямо пропорционально пористости образцов. Обнаружен эффект уменьшения центральной частоты первого эхо-импульса в зависимости от пористости композита, что объясняется влиянием пористости на электропроводность и вихревые токи в скин-слое. На основе измерений плотности и скорости распространения сдвиговой волны рассчитан эффективный модуль сдвига. В рамках математической модели, связывающей модуль сдвига с пористостью и объемной долей жестких включений, выполнена оценка концентрации армирующих многостенных углеродных нанотрубок в образцах композита.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00922, <https://rscf.ru/project/25-29-00922/>, регистрационный номер НИОКТР 125021702350-8.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА – ЛЕ ШАТЕЛЬЕ В Al-Mg СПЛАВАХ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

Е. А. Чечулина^а, П. В. Трусов^б

^а АО Уральский НИИ композиционных материалов, 614014, ул. Новозвягинская, 57, г. Пермь,
Российская Федерация

^б Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Комсомольский проспект,
29, Пермский край, г. Пермь, Российская Федерация

Алюминий-магниевые сплавы благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости широко используются в авиа- и автомобилестроении. При определенных термомеханических режимах в этих материалах наблюдается эффект Портевена – Ле Шателье (ЭПЛШ), который проявляется в виде повторяющихся движущихся полос сдвига и резких изменений напряжений в процессе монотонного деформирования. Локализация деформации вызывает полосы сдвига, рост шероховатости и снижение коррозионной стойкости. Целью работы является выявление закономерностей проявления ЭПЛШ в сплаве АМгбМ при сложных программах нагружения для исключения опасных режимов из технологических процессов. Проведены механические испытания тонкостенных трубчатых образцов на двухосевой сервогидравлической системе Instron 8850 при простых и сложных программах нагружения с регистрацией полей деформаций (DIC). Деформационный рельеф определен с использованием интерферометра-профилометра New View 5010, диаграммы деформирования обработаны с применением вейвлет-анализа. Для теоретического описания ЭПЛШ предложена многоуровневая физически-ориентированная конститутивная модель, учитывающая взаимодействие дислокаций с атомами примесей.

Получены данные о влиянии истории нагружения на кинетику ЭПЛШ. Установлено, что смена траектории нагружения приводит к «подавлению» прерывистой текучести на переходном этапе, а критическая деформация зависит от истории деформирования. Выявлены смешанные типы неустойчивости, характерные для сложных траекторий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №25-19-00785).

СТАБИЛИЗАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И КИНЕТИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОРИСТОСТИ УУКМ ДЛЯ КОСТНЫХ ИМПЛАНТАТОВ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Е. С. Разумовский^а, А. А. Чекалкин^б

^а Акционерное общество «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов»,
614014, ул. Новозвягинская, 57, г. Пермь, Российская Федерация

^б ФГАОУ ВО «Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет», 614990,
ул. Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) с пироуглеродной матрицы являются перспективными материалами для имплантатов. УУКМ минимизируют эффект экранирования напряжений и обеспечивают качественный остеогенез благодаря высокой величине поверхностной энергии (47,84 мДж/м²). УУКМ имеет особенность, которая заключается в накоплении повреждений в матрице. Повреждения связаны с некоторыми положениями зёрен, совокупность которых образует экстремальные кластеры, в которых реализуются мезонапряжения, приводящие к повреждениям. Для минимизации реализации данного фактора была проведена высокотемпературная обработка (ВТО). Теоретически выявлено и экспериментально подтверждено, что слияние малых пор в более крупные обуславливается разницей в химических потенциалах $\Delta\mu$ атомов в порах, имеющих различную кривизну. Разница μ между поверхностями различной кривизны рождает градиент, что обуславливает диффузионный перенос. Наиболее энергетически невыгодными являются открытые поры, которые в процессе ВТО укрупняются, частично аннигилируют, а другая часть преобразуется в закрытые поры. С позиции биофизики открытые и крупные поры, а также величина поверхностной энергии являются ключевыми свойствами биоматериала. Поэтому целью исследования являлся поиск температуры ВТО, при которой происходят малые перестройки структуры и слияние пор, и температурой, которая приводит к резкому росту текстурированности и существенному снижению пористости.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2026-0006).

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В КОМПОЗИТАХ СИСТЕМЫ Ti-B-C ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

И. С. Герцель^{а, б}, А. Г. Маликов^а, А. Н. Шмаков^б

^а Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, Российская Федерация

^б ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов» ФИЦ «Институт катализа СО РАН», 630559, пр. Никольский, 1, Новосибирская область, р.п. Кольцово, Российская Федерация

Разработка композитов на основе ВТб, армированных боридами (TiB, TiB₂) и карбидами (B₄C, TiC), сдерживается недостатком данных о термической стабильности упрочняющих фаз в условиях термического нагружения. Методы *in situ* дифракции синхротронного излучения (СИ) позволяют в реальном времени отслеживать структурную эволюцию материалов, что необходимо для оценки ресурса деталей ГТУ.

Исследование выполнено с использованием дифракции СИ в геометрии Вульфа-Брэгга ($\lambda = 1.01 \text{ \AA}$) при нагреве покрытий (полученных методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ)) в интервале 23–1100 °С. Проведен рентгеноструктурный анализ, а также показана эволюция фазового состава. Были проведены трибологические испытания при 23 °С и 400 °С, анализ микроструктуры и определена микротвердость. Установлено, что режимы ПЛВ коррелируют с концентрацией вторичных фаз, что определяет механические свойства и термическую стабильность композита.

Применение *in situ* дифракции СИ позволяет раскрыть фундаментальные механизмы фазовой эволюции в ТМК при нагреве: зарождение, рост и распад армирующих частиц TiB/TiC др. Проведённые эксперименты предоставляют уникальные данные о кинетике фазовых переходов в реальном времени, которые недоступны при *ex situ* анализе.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Научное обоснование и создание инфраструктуры на основе использования синхротронного излучения для диагностики функционально-градиентных материалов» (Соглашение № 075-15-2025-459).

УЧЕТ ДИССИПАЦИИ И ВЯЗКОСТИ В СКОРОСТЯХ ГРУППОВЫХ ВОЛН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТРУКТУРЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ ВЯЗКО-УПРУГИХ МОДЕЛЕЙ

Д. А. Третьяков, А. О. Арифиллина, В. С. Хоменко, Е. Д. Мешков,
Д. Б. Куатхина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, ул. Политехническая, д. 29 л. Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для описания акустоупругого эффекта в телах кристаллической структуры с 1930-х годов используется нелинейно-упругая модель Мурнагана. Благодаря введению упругой кубической нелинейности данная модель позволяет описать зависимость скоростей упругих волн от величины статической деформации, которая наблюдается экспериментально и получила название акустоупругого эффекта. Однако классическая теория акустоупругости не учитывает влияние на скорости волн целого ряда факторов, в числе которых – влияние вязкости и вязкой диссипации. Результаты современных экспериментов показывают, что это влияние существенно для анизотропных материалов, к числу которых относится промышленный прокат.

Целью данной работы является разработка новых моделей акустоупругости, учитывающих влияние вязкости посредством использования многокомпонентных реологических моделей. Рассмотрены четыре различных типа дифференциальных уравнений линейных вязкоупругих материалов, для которых получены решения волновых задач о распространении плоской гармонической волны. Полученные решения представляют собой зависимость скоростей групповых волн от величины статической деформации с учётом вязкости материала. Результаты исследования могут быть использованы при идентификации результатов ультразвукового контроля в металлах.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 25-29-01480.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОКАТЕ ПРИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИИ

Д. Б. Куатхина, Д. А. Третьяков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, ул. Политехническая, д. 29 л. Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Измерение скоростей ультразвуковых волн может использоваться в неразрушающем контроле для определения текущего напряжённо-деформированного состояния. Для корректной интерпретации измерений требуется разделить влияние упругих и пластических деформаций, накопленных повреждений и текстуры (микроструктуры) металла. Решению данной проблемы посвящены различные методы акустоупругости и акустоповреждённости. Однако эффекты, связанные с ростом величины пластических деформаций, до сих пор малоизучены. Они наиболее подробно рассмотрены в работах Л.Б. Зуева, где было выдвинуто предположение о связи между характером изменения скоростей волн Рэлея и Лэмба со стадиями пластической деформации.

В настоящей работе получены экспериментальные зависимости для групповых скоростей объёмных продольных и поперечных волн в алюминиевом прокате в широком диапазоне упруго-пластических деформаций при одноосном нагружении. Для обработки результатов экспериментов разработана программа оцифровки данных регистрации многократно отражённых волновых пакетов, а также разработан алгоритм корректного определения границ временных задержек между импульсами по синфазным точкам. Установлено наличие корреляции между скоростями ультразвуковых волн и стадиями пластического течения металла – упрочнением, образованием шейки и разрушением. Полученные зависимости качественно совпадают как для продольных, так и для поперечных волн.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 25-29-01480.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КЛИНОВИДНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В. В. Артемьев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990,
пр-т Комсомольский, 93, г. Пермь, Российская Федерация
slavaav@mail.ru

Ключевые слова: технологический процесс, толстостенная конструкция клиновидной формы, полимерный композиционный материал, технологические напряжения и деформации.

В связи с расширением области применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) можно выделить отдельный класс толстостенных конструкций клиновидной формы. Характерными особенностями данного класса конструкций можно отнести наличие трех различных по толщине зон: зона с максимальной толщиной, зона с минимальной (обычно в 2 и более раз меньшей) толщиной и переходной клиновидной зоны. Для данного класса конструкций выявлены дефекты в виде расслоений, обусловленные высоким уровнем технологических напряжений, возникающих на этапе изготовления.

Проанализированы основные составные части механизма возникновения технологических деформаций в классе конструкций из ПКМ клиновидной формы и разделены на три группы в зависимости от причин возникновения: свойств материала, параметров конструкции, параметров технологического процесса.

Предложены модификации конструктивного облика толстостенной конструкции в зоне технологического припуска: «секторное» армирование, локальное «секторное» армирование, внедрение вкладыша из однородного эластичного материала, разделение заготовки конструкции с помощью демпфирующей прокладки. Выполнена численная оценка эффективности предложенных методов по снижению уровня технологических напряжений.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ХРУПКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МИКРОСТРУКТУРАХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

А. А. Ташкинов, В. Е. Шавшуков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Рассмотрен внутризеренный механизм инициации хрупких разрушений в поликристаллических материалах. Физическим механизмом хрупкого разрушения зерен является скол по плоскостям спайности.

Поля мезонапряжений в поликристаллах являются случайными сильно флуктуирующими полями. Первые повреждения локализуются в зернах с максимальными значениями мезонапряжений. Такие состояния реализуются в специфических группах зерен, названных экстремальными микроструктурами. Для вычисления вероятностей повреждений в таких зернах необходимо знание вероятностей распределения мезонапряжений в зернах. В работе применен метод интегральных уравнений для нахождения тензоров мезодеформаций в поликристаллическом теле. По массивам решений для большого количества реализаций зеренных структур поликристалла восстанавливаются распределения мезодеформаций, а по ним мезонапряжений.

Разработанный формализм применен для анализа повреждений в углерод-углеродном материале эндопротезов человека, успешно применяемых в клинической практике. Построены плотности вероятностей распределения мезонапряжений, по которым вычислены вероятности различных возможных типов повреждений как функций общей нагрузки на конструкцию.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2026-0006).

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ОТВЕТСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

И. В. Макаренко*, Л. В. Макаренко

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
101000, Малый Харитоньевский переулок, 4, г. Москва, Российская Федерация

* I.V.Makarenko@yandex.ru

В данной работе получены параметры нелинейных уравнений состояния для описания кинетики упругопластических разнонаправленных процессов деформирования в широком диапазоне температур. Приемлемость указанных исследований оценивается специальными экспериментами на образцах из аустенитной стали типа 08X18H10T с наклонными поверхностными полуэллиптическими трещинами и численными расчетами. Данная задача актуальна для конструкций объектов нового ответственного оборудования с учетом возникновения и развития в них локальных упругопластических разрушений типа разноориентированных полуэллиптических трещин. На основе деформационных критериев разрушения, получены результаты, позволяющие получить уточняющие решения для параметров нелинейной механики разрушения в соответствующем диапазоне высоких температур, а также провести комплекс уточняющих решений сингулярных и не сингулярных краевых задач нелинейной механики разрушения с предельно высокими упругопластическими деформациями. Теоретические, расчетно-экспериментальные и численные исследования локальных деформаций при высоких температурах эксплуатации элементов оборудования с данными трещинами, позволяет уточнить критериальные соотношения, определяющие прочность, эксплуатационный ресурс, живучесть и безопасность ответственного оборудования.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код научной темы, присвоенной учредителем (организацией - Федеральное государственное бюджетное учреждение ИМАШ РАН). FFGU-2024-0020.

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕГО И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА 1565Ч

А. А. Вшивкова, А. И. Швейкин, Э. Р. Шарифуллина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, пр. Комсомольский, 29,
г. Пермь, Российская Федерация

Необходимость создания функциональных материалов-изделий с улучшенными свойствами приводит к необходимости использования при проектировании моделей материала, позволяющих прогнозировать изменение в процессе термомеханической обработки структуры материала и определяемых ей свойств. При этом интерес вызывает горячая обработка с реализацией сверхпластического деформирования, позволяющая получать высокие эксплуатационные свойства изделий, более гладкую поверхность, уменьшать расход материала.

В рамках работы предложена модификация расширенной трехуровневой модели на базе физических теорий пластичности для перспективного отечественного алюминиевого сплава 1565ч. Для описания различных механизмов деформирования и перестроения структуры (внутризеренное дислокационное скольжение, зернограничное скольжение, динамическая рекристаллизация, ротации кристаллической решетки) формулируются отдельные подмодели. Модель позволяет описывать поведение материала как в режиме развитой сверхпластичности, так и в подготовительных и переходных режимах. Модель идентифицирована и верифицирована при различных температурах и скоростях деформирования, верификация модели усилена исследованием устойчивости результатов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00747, <https://rscf.ru/project/25-19-00747/>.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ В ОПЫТАХ НА ЦИКЛИЧЕСКОЕ КРУЧЕНИЕ

**О. А. Староверов, С. В. Словигов, А. В. Ильиных, А. В. Лыкова,
А. И. Мугатаров, А. В. Сивцева**

ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, пр-т. Комсомольский, 29, г. Пермь, Российская Федерация

В работе представлена методика испытаний трубчатых образцов из стеклопластикового композита при статическом и циклическом кручении. Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки усталостной долговечности полимерных композитов в условиях сложного напряженного состояния. Решение методических проблем связано с регистрацией петель гистерезиса без использования датчиков деформации. Предложен подход к их построению путем учета жесткости нагружающей системы. Введен коэффициент, учитывающий соотношение жесткостей образца и испытательной машины.

На основе анализа кинетики параметров петель гистерезиса предложена метрика поврежденности, применимая для прогнозирования циклического ресурса композитных конструкций. Проведен анализ снижения динамической жесткости стеклопластика в опытах на циклическое кручение. Выявлен трехстадийный характер деградации жесткости. Результаты демонстрируют возможность и целесообразность применения предложенных подходов для прогнозирования состояния композитных конструкций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-79-10194).

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОДВИЖНОСТЬ ГРАНИЦ ЗЕРЕН

Д. С. Безверхий, М. Н. Балдин, Н. С. Кондратьев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Комсомольский проспект,
29, г. Пермь, Российская Федерация

В процессах горячей обработки металлов давлением реализуются процессы рекристаллизации и возврата. Для сплавов с низкой энергией дефекта упаковки рекристаллизация преобладает над возвратом. Наличие примесей в конструкционных сплавах является одним из значимых факторов, влияющих на реализацию и интенсивность процессов. Это влияние может осуществляться как за счет выделенных частиц вторичных фаз, так и за счет атомов растворенных веществ. В работе представлена модификация многоуровневой статистической модели динамической рекристаллизации, направленная на учет влияния диффузии сегрегированных атомов легирующих элементов.

Верификация предложенной модели выполнена для нержавеющей стали AISI 304Н и AISI 304НР при одноосном сжатии в диапазоне температур 950–1100 °С. Результаты моделирования имеют высокую степень согласованности с экспериментальными данными по диаграммам нагружения, среднему размеру зерен и кристаллографическим текстурам. С использованием модели осуществлено описание многостадийной горячей прокатки листа, включающей черновую и чистовую обработки. На этапе черновой прокатки измельчение зерен происходило за счет динамической рекристаллизации, на этапе чистовой прокатки – за счет деформационного дробления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002.

ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСЛОКАЦИЙ С ГРАНИЦАМИ ЗЕРЕН

К. А. Курмоярцева, П. В. Трусов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990,

Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Границы зерен являются сильными препятствиями для движения дислокаций, что приводит к образованию скоплений дислокаций, локализации пластических деформаций, локальным искривлениям и ротации решетки, концентрации напряжений, формированию микротрещин. Описание деформационного поведения многофазных материалов, таких как дуплексные стали, осложняется наличием межфазных границ зерен феррита (ОЦК, α) и аустенита (ГЦК, γ). Разные физико-механические свойства и кристаллические решетки фаз материалов на границе приводят к значительной неоднородности деформаций.

В рамках данного исследования предполагается расширение разрабатываемой на кафедре математического моделирования систем и процессов ПНИПУ физически-ориентированной трехуровневой модели подмоделью для описания межкристаллитных потоков дислокаций. На мезоскопическом уровне при континуальном рассмотрении плотностей дислокаций рассматриваются отток и приток дислокаций через границы зерен и субзерен. Потоки дислокаций реализуются между кристаллитами с учетом типа кристаллической решетки (ОЦК/ГЦК). В границах возможно образование остаточных дислокаций, которые в дальнейшем влияют на критические напряжения на системах скольжения обоих соседних кристаллитов. Разрабатываемая подмодель в рамках физически-ориентированной модели позволяет описать зернограничное упрочнение и локализацию пластической деформации вблизи границ зерен и фаз.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 25-19-00785.

КОМПОЗИТНЫЕ БАЛОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ЗАДАННОЙ ФОРМОЙ ПРОГИБА ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Н. А. Татусь, Д. Д. Власов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, Малый Харитоньевский переулок, 4, Москва,
Российская Федерация

Композитные технологии «выросли» до возможности изготавливать «ажурные» профилированные конструкции с заданными механическими характеристиками. Если еще 10 лет назад казалось фантастикой изготовление композитных стержней с переменными размерами, но с постоянной площадью поперечного сечения (балки «констэра»), то в настоящий момент появились технологии 3D печати с армированием непрерывными волокнами, которые позволяют сделать такой трюк. Особенно заманчиво выглядит создание непосредственно в космосе конструкций рефлекторов антенн и телескопов без ограничения габаритных размеров, поскольку, чем больше размер рефлектора, тем выше разрешающая способность антенны или телескопа. Применение профилированных композитных стержней в подобных конструкциях поможет решить задачи геометрической стабильности при воздействии инерционных сил, а также при нагреве конструкции солнечным светом. В докладе приводится математическое обоснование эффективности композитных профилированных элементов, для конструкций космического базирования с заданной формой прогиба.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России
Соглашение № 075-15-2025-646 от 20.08.2025 г.

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВАНИЯ ПО УДАРНО-ДИНАМИЧЕСКОМУ ОТКЛИКУ С АНАЛИЗОМ ЕДИНСТВЕННОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ

В. С. Выплавень, С. А. Бехер

Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, ул. Дуси-Ковальчук, 191, г. Новосибирск,
Российская Федерация

В работе исследуется обратная задача восстановления вязкоупругих характеристик основания по ударно-динамическому отклику установки динамического нагружения. В качестве диагностического сигнала используется зависимость ускорения нагрузочного штампа от времени. Решение обратной задачи определения неизвестных параметров основания заключается в создании механической модели, выходными данными которой является диагностический сигнал, поиске значений неизвестных параметров, при которых модель будет максимально точно описывать реальные диагностические сигналы.

Для описания процесса нагружения принята нелинейная одномерная модель с тремя массами: падающий груз, штамп и инерционная масса основания. В модели учитываются вязкоупругие свойства основания, односторонний характер контакта и нелинейная зависимость жесткости основания от деформаций. Искомый вектор параметров включает инерционную массу основания, линейные и нелинейные составляющие коэффициента жесткости и параметры демпфирования. Подбор параметров выполняется путем минимизации нормализованной среднеквадратичной ошибки между экспериментальными и расчетными диагностическими сигналами.

Для оценки единственности и устойчивости решения обратной задачи в работе рассматриваются серии запусков оптимизации из разных начальных точек, оцениваются коэффициенты вариации параметров и профиль целевой функции. Такой подход позволил определить хорошо идентифицируемые параметры и функционал, обеспечивающий наибольшую устойчивость решения.

ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ МИКРТВЕРДОСТИ ПО ДЛИНЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ СЛИТКОВ, ФОРМИРУЕМЫХ СВС-ПРОЦЕССАМИ

С. Г. Жилин

Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН, 681005, ул. Металлургов, 1,
г. Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация

Проблемным фактором в процессах формирования пространственных функционально-градиентных сплавов (ФГС) и получения элементов конструкций из них представляется обеспечение бесступенчатого перехода между структурами сопрягаемых разнородных материалов, что в значительной мере сужает область их применения.

Технологически приемлемым вариантом получения протяженных функционально-градиентных слитков, состоящих из железосодержащих сплавов, представляется одностадийный СВС-процесс алюмотермитного переплава различных по химическому составу термитных шихт, последовательно располагаемых в огнеупорных формах. Принципиальным отличием от методов послойного создания функциональной поверхности на матричном металле в данном случае является полностью жидкофазное формирование всего тела металлокомпозита из сплавов различного химического состава. Непродолжительный характер взаимодействия компонентов различной природы обеспечивает локальное смешивание расплавов на протяжении формирующегося ФГМ-слитка и минимальное выгорание легкоплавких элементов.

Косвенной оценкой прочностных характеристик различных участков таких ФГМ-слитков может служить распределение значений микротвердости HV по их длине. В этой связи целью работы стало определение влияния условий протекания переплавных СВС-процессов на реализацию возможности формирования пространственных ФГМ-слитков из железосодержащих сплавов с легирующими компонентами: Al, Cr и Cu. Определено, что экспериментальные ФГМ-слитки характеризуются плавным изменением химического состава, структур и значений микротвердости HV.

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ МАРКИ 76ХФ С ВЫСОКИМИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМИ СВОЙСТВАМИ

И. А. Олифиренко^а, Т. Н. Осколкова^б, Е. В. Полевой^а

^а АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», 654043, шоссе Космическое, 16, г. Новокузнецк, Российская Федерация

^б Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, Российская Федерация

В работе исследовали стойкость к износу и контактно-усталостным дефектам дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов типа Р65, произведенных из стали 76ХФ стандартного состава (№ 1) и с повышенным содержанием С, Мп, Сг (№ 2). Целью исследований является сравнительная оценка влияния химического состава на процесс адгезионно-деформационного механизма трения образцов, при испытаниях на роликовой машине TR-25, с одинаковыми роликовыми контртелами твердостью 60 HRC.

Рельсы состава № 1 и № 2 произведены по одинаковым энерго-технологическим и температурно-временным режимам нагрева, прокатки и термообработки. Относительно образцов из рельсовой стали № 1, образцы из стали № 2 отличаются более высокой, на 15,92 НВ (4,2%) твердостью, более дисперсным строением перлита с уменьшенным расстоянием между соседними пластинами цементита и феррита на 16,51 % и меньшим (на 19,42 %) значением диаметра исходного аустенитного зерна.

Испытания на трение проводили при нагрузке 1,2 кН, с установленным коэффициентом проскальзывания 10 %, со скоростью 217 об/мин. Образование одиночных контактно-усталостных дефектов зафиксировано при 572...598 тыс оборотов. Достижение предельного состояния по наступлении стадии множественных дефектов зафиксировано для обоих составов при 702 тыс. оборотов, после чего испытания были завершены. Зафиксирована потеря массы образцов из рельсов с повышенным содержанием С, Мп, Сг на 25,32% ниже, чем на образцах стандартного состава.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ NARX МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ С УЧЕТОМ ИСТОРИИ ДЕФОРМАЦИИ

А. С. Смирнов, В. С. Канакин, О. Ю. Муйземнек, Е. О. Смирнова

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

При горячей пластической деформации напряжение текучести определяется термомеханической предысторией, обусловленной конкуренцией процессов упрочнения и разупрочнения. Это требует перехода от статических реологических моделей к динамическим. Известные рекуррентные нейросетевые архитектуры (RNN, LSTM, GRU) ресурсоемки и демонстрируют снижение прогностической точности при отклонении от временного шага интегрирования, заданного при обучении.

Предложена гибридная реологическая модель, включающая феноменологическое уравнение начального предела текучести и нейросеть NARX. Эффекты предыстории учитываются через вектор состояния на одном предшествующем временном шаге, что минимизирует требуемую глубину памяти. Для повышения обобщающей способности в обучающую выборку введены режимы с варьируемым шагом и немонотонным изменением скорости деформации.

Верификация на композите В95/2,5%TiC ($300\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,1\text{--}6\text{ c}^{-1}$) продемонстрировала среднюю относительную погрешность 1,5% при максимальном разбросе $\pm 5\%$. Модель физически адекватно описывает локальные особенности реологического отклика, включая стадии разупрочнения при нестационарном скоростном нагружении.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ В95-TiC И НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В. С. Канакин, А. С. Смирнов, В. П. Швейкин

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

В современном машиностроении особое внимание уделяется композиционным материалам, обладающих повышенными удельными характеристиками. Свойства изделия во многом определяются его микроструктурой, что диктует необходимость проведения технологических операций, с целью достижения требуемого уровня свойств. Одной из таких операций является термодиформационное воздействие. Таким образом, цель работы – определение влияния объемной доли частиц TiC на формирование микроструктуры и физико-механических свойств композиционных материалов на основе сплава В95, а также нейросетевое моделирование эволюции микроструктуры в ходе термодиформационного воздействия.

Композиты системы В95-TiC, упрочненные частицами со средним размером 1,2 мкм, были изготовлены жидкофазным *ex-situ* методом. Для композита с 2,5% TiC проведено нейросетевое моделирование эволюции микроструктуры в ходе термодиформационного воздействия в диапазоне температур 300–500 °С и скоростей деформации 0,1–5 с⁻¹

Анализ композитов показал возможность улучшения механических свойств до 35% в литом состоянии и до 10% в состоянии Т1 после прокатки. Установлено, что в процессе термодиформационного воздействия частицы TiC проявляют барьерный эффект.

НОВЫЕ АЗОТСОДЕРЖАЩИЕ ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Н. Н. Соболева^а*, А. В. Березовский^а, А. Н. Мушников^а, В. Е. Веселова^а,
А. Н. Балин^б, М. А. Шолохов^в

^а Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, 620049,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

^б ООО «Завод сварочных материалов», 623700, ул. Западная промзона, 18, г. Березовский,
Российская Федерация

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

* natashasoboleva@list.ru

При производстве тяжело нагруженных сварных изделий с применением в конструкции высокопрочных легированных сталей актуальны вопросы повышения производительности, снижения затрат на исправление брака и повышения эксплуатационных характеристик сварных соединений. Однако имеющиеся на сегодняшний день решения являются компромиссом между хорошей свариваемостью стали и механическими характеристиками сварных соединений. Целью работы явилась разработка экономно-легированных азотсодержащих порошковых проволок, обеспечивающих получение качественных и прочных сварных соединений. На ООО «Завод сварочных материалов (Свердловская область, г. Березовский) изготовлены опытные составы порошковых проволок с содержанием азота более 0,3%, обеспечивающие аустенитно-ферритный фазовый состав наплавленного металла. Наиболее перспективными из них, а также используемой в настоящее время проволокой сплошного сечения Св-08Х20Н9Г7Т, выполнена дуговая сварка пластин высокопрочной стали. Испытания механических свойств показали более высокую прочность при сопоставимой пластичности сварных соединений, выполненных с применением разработанных порошковых проволок, чем при использовании проволоки Св-08Х20Н9Г7Т. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20059 (<https://rscf.ru/project/24-19-20059/>) и Правительства Свердловской области.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ Ni-SiC ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕ

А. В. Ганеев^{а, *}, А. С. Квятковская^а, Ю. Б. Сабурова^а, В. А. Белоногов^а,
Р. Д. Еникеев^а, В. В. Астанин^а, С. О. Карабаев^б

^а Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», 450076, ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, Российская Федерация

^б Кыргызский национальный университет имени Жусупа Баласагына, 720033, ул. Михаила Фрунзе, 547,
г. Бишкек, Республика Кыргызстан

* artur_ganeev@mail.ru

Никелевые покрытия используются для рабочих поверхностей цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Поверхность алюминиевого цилиндра покрыта тонким слоем композиционного материала на основе никеля. В 90-е годы большинство производителей использовали подобную технологию в своих моторах с высокой форсировкой. Никелевое покрытие наносится гальваническим способом или электроосаждением на внутреннюю поверхность алюминиевого цилиндра. Для увеличения износостойкости и твердости в покрытии добавляется карбид кремния.

Целью работы являлось получение износостойкого композиционного никелевого покрытия типа «Никасил» на плоских образцах из алюминиевых сплавов типа АК6 и литейного типа АК7ч. В работе сравнивались разные режимы и электролиты для нанесения никелевых композиционных покрытий на поверхность алюминиевых образцов. Оценку содержания химических элементов покрытия и основного материала проводили нарастровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM-6490 LV с использованием микроанализатора рентгеновского INCA-Energy. Механические свойства покрытия оценивали методом царапания при помощи скретч-тестера CSM Micro-Scratch Tester и измерением микротвердости по сечению покрытия. Испытания покрытия на износостойкость проводились по методу «шарик-по-диску» на трибометре Nanovea при температуре 200 °С.

Показана возможность получения качественных электролитических покрытий Ni-SiC кремния из сульфаминовокислых электролитов различного состава. Установлено, что из изученных растворов возможно получение износостойких покрытий в интервале плотностей тока от 1 до 7 А/дм². Наибольшая износостойкость и твердость характерна для покрытия, содержащего 19,9 % кремния, в составе карбида кремния, распределенного равномерно в покрытии, который был получен в электролите на основе никеля сульфаминовокислого, с добавками АДЭ-3.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ПРИ МНОГООСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НЕРАВНОКОМПОНЕНТНОМ СЖАТИИ ПЕСЧАНИКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ВРАЩЕНИЕМ ЭЛЛИПСОИДА ЛАМЕ

И. А. Пантелеев^а, А. В. Зайцев^{б, *}, К. Б. Устинов^в, В. В. Химуля^в, Н. И. Шевцов^в,
В. И. Карев^в, Ю. Ф. Коваленко^в

^а Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

^б Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

^в Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

* a-zaitsev@mail.ru

Для описания механизмов и условий проявления эффекта памяти (эффект J. Kaiser) в горных породах при трехосном непропорциональном циклическом сжатии с изменением ориентации и формы эллипсоида Ламе, проведены эксперименты с кубическими образцами песчаника на Испытательной системе трехосного независимого нагружения с непрерывной записью сигналов акустической эмиссии. Результаты непропорционального сжатия по 4-х и 9-ти цикловым программам показали, что преобладающим механизмом проявления эффекта памяти в каждом определенно ориентированном ансамбле дефектов является развитие микротрещин нормального отрыва, ориентированных субнормально к направлению минимального главного напряжения. Эти проявления определяются не фактом раскрытия существующих «благоприятно» ориентированных микротрещин, а дискретным ростом существующих и появлением новых дефектов. Проведенные эксперименты по циклическому деформированию песчаника при постоянном среднем напряжении и изменяющемся уровне девиатора напряжений показали независимость эффекта памяти от интенсивности касательных напряжений. Полученные результаты могут послужить триггером для развития подходов, учитывающих ориентационные эффекты эволюции повреждений при различных сложных напряженно-деформированных состояниях и реальных условиях трехосного непропорционального нагружения, которые наблюдаются на практике при эксплуатации подземных сооружений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 25–21–00442).

К ВОПРОСУ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ ДЛЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ

А. Е. Аммосова^а, М. М. Копырин^а, А. К. Кычкин^б

^а ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», 677000, ул. Петровского, 2, г. Якутск, Российская Федерация

^б Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, ул. Октябрьская, 1, г. Якутск, Российская Федерация

В работе уточнена методика определения открытой пористости композитной арматуры и показано, что измеряемое значение зависит от геометрии образца и состояния торцов. Была исследована базальтопластиковая арматура, модифицированная диоксидом кремния марки Таркосил Т50 и Т135 (0,25, 0,5, 1,0 и 3,0 масс.%). Открытую пористость определяли методом гидростатического взвешивания с пропиткой керосином для образцов длиной 5, 10, 30 и 50 мм при открытых и герметизированных торцах (в каждой серии было по 3 шт образцов).

Установлено, что уменьшение длины образцов до 5–10 мм увеличивает регистрируемые значения открытой пористости в 2–4 раза по сравнению с образцами длиной 30–50 мм. Это объясняется тем, что увеличена доля продольных поровых каналов через торцевые поверхности и уменьшением длины фильтрационного пути пропитывающей жидкости.

Герметизация торцевых поверхностей приводит к снижению измеряемых значений открытой пористости и уменьшению разброса экспериментальных данных, в которых включены только поры, доступные через боковую поверхность, исключая торцевую поверхность. При этом, также наблюдается увеличенное значение пористости для коротких образцов. Добавление модификатора слабо влияет на открытую пористость и не демонстрирует устойчивого систематического характера.

Таким образом, выполненное исследование показало, что необходим учет геометрических параметров, а также конфигурация торцов, при разработке методик определения пористости стержневых композиционных материалов.

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛА 08X18H9-09Г2С, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

В. Е. Веселова^а, И. А. Веретенникова^а, К. В. Матвеева^б

^а Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

^б ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620062, ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Холодная прокатка биметаллов из конструкционных и нержавеющей сталей, изготовленных по технологии сварки взрывом, способствует совмещению коррозионных свойств с прочностью и дешевизной конструкции, при этом улучшая ряд эксплуатационных характеристик и геометрической точности изделия. В данной работе исследована эволюция структуры и механических свойств биметалла 08X18H9-09Г2С после холодной прокатки с различной степенью обжатия.

Структурные исследования показали, что холодная прокатка при обжатии от 20 до 50 % способствовала снижению волнообразности границы раздела между слоями биметалла, уменьшая местные выступы и углубления на поверхности соединения, а также снижению пористости, образовавшейся при сварке взрывом. Увеличение степени обжатия приводило к более равномерному распределению микротвердости и размера зерна по сечению образца, что снижает риск преждевременного разрушения при статических и циклических нагрузках.

Увеличение степени деформации до 50 % способствовало росту прочностных свойств на 38...40 % до значений $\sigma_{0,2}=1180$ МПа и $\sigma_B=1290$ МПа при одновременном снижении пластичности.

МИКРОСТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА $Ti_{50.2}Ni_{49.8}$ ПРИ МНОГОКРАТНЫХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ И ПОСЛЕДУЮЩИХ ОТЖИГАХ

И. А. Хатипов^а, А. А. Чуракова^{а, б}

^а Уфимский университет науки и технологий, 450076, ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, Российская Федерация

^б Институт физики и молекул и кристаллов УФИЦ РАН, 450075, ул. Проспект Октября, 151, г. Уфа,
Российская Федерация

Сплавы с памятью формы (СПФ) на основе системы TiNi представляют особый интерес для материаловедения, благодаря функциональным свойствам: эффекту памяти формы, псевдоупругости. Целью работы было изучение влияния отжига после термоциклической обработки на структурно-механические характеристики в сплаве TiNi. Материалом исследования был выбран сплав $Ti_{50.2}Ni_{49.8}$ ат.%. КЗ структура получена закалкой при 850°C 1 час в воду, а УМЗ - закалка с последующим РКУП при 450°C по маршруту Вc с количеством проходов 3. Термоциклирование образцов осуществлялось охлаждением до температуры -196°C с выдержкой 2 минуты с последующим нагревом до температуры 175°C в течение 7 минут. Образцы подвергались отжигу при температурах 400°C и 500°C в течение часа. Размер зерен КЗ термоциклированных состояний после отжигов 400°C и 500°C увеличиваются. С помощью механических испытаний определялись предел фазовой текучести (σ_M), предел дислокационной текучести (σ_T) и предел временному сопротивлению разрыву (σ_B). Все эти параметры уменьшаются для предварительно отожженных образцов, которые не были подвергнуты термоциклированию, как для КЗ, так и для УМЗ состояний. Для образцов со 100 термоциклами прочностные показатели увеличиваются после отжигов. В итоге в работе было исследовано влияние отжига на микроструктуру сплава, подвергнутого термоциклированию. Были изучены механические свойства термоциклированных образцов до и после отжига.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ТОЛЩИНЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

И. Н. Одинцев, Т. П. Плугатарь

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, 101990, Малый Харитоньевский пер. 4, г. Москва,
Российская Федерация

При производстве тонколистового проката, материал подвергается различным технологическим процессам: таким как температурный нагрев, сжатие (деформация) валками и последующее охлаждение. После завершения этих воздействий в материале образуется неоднородное поле остаточных напряжений, которое будет оказывать влияние на механические характеристики продукции. Это влияние может иметь негативный характер: снижается конструкционная прочность и долговечность. Поэтому исследование остаточных напряжений является одной из наиболее важных задач. Для ее решения в экспериментальной механике на сегодняшний день самыми распространенными являются разрушающие методы. Они позволяют получать наиболее достоверные и адекватные результаты.

Для исследования остаточных напряжений по толщине тонколистового проката используется метод постепенного наращивания узкого выреза-паза. При удалении каждого слоя происходит перераспределение напряженно-деформированного состояния в оставшемся материале. Регистрация и последующий анализ возникшего деформированного состояния позволяют восстановить исходные напряжения, которые были сняты.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания FFGU-2024-0020.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С НЕРЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ СОТ

Т. П. Плугатарь^а, А. Н. Волков^б

^а Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, 101990, Малый Харитоньевский пер. 4, г. Москва,
Российская Федерация

^б Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Волоколамское
шоссе 4, Москва, Российская Федерация

В авиастроении и ракетно-космической области широкое распространение получили трёхслойные композитные панели с сотовым наполнителем. В основном это связано с высокой жесткостью и низким весом данных конструкций. Однако регулярная структура сот приводит к неравномерному распределению напряжений в панелях и не позволяет адаптировать к сложным условиям нагружения. Развитие аддитивных технологий сделало возможным решать сложные технологические задачи и создавать рациональные нерегулярные структуры сотовых наполнителей, которые повышают эффективность применения трёхслойных композитных панелей в ответственных элементах аэрокосмических объектов. Однако сложность структуры таких конструкций не позволяет анализировать их с помощью аналитических методов, что делает важным численное и экспериментальное исследование таких структур.

В работе приведены результаты численного и экспериментального исследования трёхслойных панелей с нерегулярной структурой сот, созданных с помощью 3D печати. Изменение размеров ячеек наполнителя задавалось на основе критерия наибольших касательных напряжений. Испытания шарнирно опертых прямоугольных пластин, нагруженных распределенной силой, проводилось с помощью уникальной оснастки, перемещения регистрировались с использованием метода корреляции цифровых изображений. Анализ результатов показал хорошее соответствие численных и экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, Соглашение № 075-15-2025-646.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ОПОР ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Н. А. Татусь, Д. Д. Власов, А. Э. Поляков, А. Н. Полилов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, 101000, Малый Харитоньевский переулок, Москва,
Российская Федерация

В работе рассматривается трехточечный изгиб композитной балки прямоугольного профиля с известными параметрами: w , h – ширина и толщина образца, r – радиус цилиндрических опор, L – расстояние между центрами опор, v – прогиб, P – нагрузка. Для повышения точности необходимо учитывать смещение точки опоры образца по вертикали, уменьшение длины пролета балки и изменение направления силы реакции опоры. Цель настоящей работы – определение погрешности при расчете прогиба при замене кривой третьего порядка окружностью. Очевидно, что чем меньше прогиб, тем точнее приближение. Инженерные расчеты не предполагают больших прогибов, поэтому традиционный расчет (балка Бернулли) не учитывает углы поворота, он прост и надёжен. Когда появляются большие прогибы и неучет поворота сечения ведет к большим ошибкам, применяют теорию Тимошенко, при расчете такие балки иногда называют его именем. В этом случае упрощение расчета заметно скажется на оценке поведения балок при изгибе. В работе проведена оценка влияния изменения радиуса цилиндрических опор на определяемые в эксперименте параметры.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН (СМП) ФОРМЫ CNMG

И. А. Веретенникова^а, А. А. Дейч^б

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

^б ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

СМП являются основным режущим элементом, обеспечивающим высокую скорость резания. Большинство современных СМП изготавливаются из твердых сплавов (WC-Co), которые обладают высокой прочностью, но склонны к хрупкому разрушению и адгезионному износу при высоких температурах.

Исследовались образцы СМП формы CNMG, предназначенные для токарной обработки стальных заготовок твердостью до 42 HRC; шероховатость измерялась с помощью оптического профилометра WYKO NT1100.

При механической обработке деталей важно учесть, что поверхность СМП может стать слишком гладкой, тогда площадь сцепления подложки и покрытия будет минимальна, что плохо для высоких касательных напряжений. Отсюда появляется понятие оптимальной шероховатости.

Подготовка поверхности позволяет реализовать потенциал современных многокомпонентных покрытий на 100%, и включает в себя такие операции, как: полировка, шлифование, мойка и ионная бомбардировка. Были получены экспериментальные средние значения шероховатости образцов после спекания (3,2 Ra) и после шлифования переходящего в полировку, где обе операции проводятся с применением движения обрабатывающей части по планетарному принципу (0,433 Ra).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А. В. Ильиных

ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, пр-т. Комсомольский, 29, г. Пермь, Российская Федерация

В работе рассмотрены подходы для прогнозирования долговечности аддитивных материалов с использованием феноменологических моделей. Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки усталостной долговечности аддитивных материалов в условиях концентрации напряжений. Основной проблемой аддитивных материалов является наведенная анизотропия механических свойств при статическом и циклическом нагружении. Параметры, входящие в феноменологические модели циклической прочности, сильно зависят от направлений исследования, которые связаны с технологией изготовления аддитивных материалов. Поднимется вопрос о необходимости проведения комплекса механических испытаний для оценки этих параметров и выборе наиболее опасных комбинаций параметров моделей, с использованием которых возможен прогноз циклической долговечности аддитивных материалов в условиях концентрации напряжений.

На примере аддитивного титанового сплава ВТ6, полученного методом проволоочно-дуговой наплавки, представлены результаты прогнозирования циклической долговечности с использованием известных моделей Марина, Кроссланда и Сайнса. Показано, что наиболее удовлетворительный прогноз получился с использованием модели Марина, при использовании параметров модели, определенных в направлении печати и под углом 45 градусов к этому направлению.

ЭКСПРЕСС-МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ДЕФЕКТОВ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗЕ СИГНАЛОВ ВИБРОУСКОРЕНИЯ

А. В. Зайцев*, В. А. Мильхин**, М. М. Шобей***, И. А. Судаков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

*a-zaitsev@mail.ru, **vatyc@mail.ru, ***shobey@pstu.ru

Подшипник – один из ответственных высоконагруженных узлов. Выход из строя или появление дефектов в подшипнике приводит к нештатной работе или остановке механизма. Вибродиагностика – наиболее распространенный метод неразрушающего контроля, предусматривающий запись сигнала датчика виброускорений и его последующую обработку.

Проведены натурные испытания нагруженного 215 Н роликового подшипника NU206W при частотах вращения 1070, 2060 и 3040 об/мин. Сигнал виброускорения продолжительностью 2 с снимался через 600 с после запуска установки при заранее прогревом масле и с приработанными деталями. Нанесение дефекта производилось на ранее испытанных бездефектных подшипниках после их демонтажа. За нанесением дефекта следовали повторные испытания при тех же режимах.

Обработка временных сигналов датчика виброускорений проведена с использованием непрерывного вейвлет-преобразования. Вейвлетобразующими функциями были вещественные 2-я (Mexican Hat) и 10-я производная Gaussian Function; комплексные Paul, Gabor и Morlet. В результате проведенного анализа построен «портрет виброускорений» бездефектного роликового подшипника NU206W, идентифицированы частоты, связанные с локализованным модельным дефектом на внутреннем кольце. Разработан экспресс-метод определения дефектов подшипников качения, основанный на вейвлет-анализе сигналов виброускорения.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства высшего образования и науки РФ НИОКТР № 124020200116–1.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОНВЕЙЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ПО ДАННЫМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Г. С. Анисимов, Л. В. Степанова

Самарский университет, 443086, ул. Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

Применение голографической интерферометрии для анализа напряженно-деформированного состояния в механике разрушения ограничено трудоемкостью ручной расшифровки интерференционных картин. В работе предложен автоматизированный конвейер на базе совместного использования сверточной нейронной сети и сети Вассерштайна, позволяющий преодолеть этот барьер. Вместо традиционного анализа поля перемещений, требующего численного дифференцирования, разработан подход, напрямую связывающий интерференционную картину с искомыми параметрами разрушения. Ключевым элементом конвейера – Сверточная архитектура нейронной сети, обученная на гибридном наборе данных, состоящем из синтетических голографических картин (сформированных при помощи сети Вассерштайна) и реальных экспериментальных изображений. Сеть осуществляет семантическую сегментацию и выполняет интеллектуальную фильтрацию спекл-шума, выделяя информативные линии интерференции. Разработанный конвейер обеспечивает полную автоматизацию процесса: от загрузки голографического изображения до вычисления коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), Т-напряжений и амплитуд высших порядков. Установлено, что метод превосходит классическую расшифровку по точности (погрешность расчета КИН снижена до 5%) и производительности (время обработки одного изображения сокращено до менее чем десяти секунд). Показана высокая робастность к неравномерной засветке и шумам, что делает предложенный конвейер эффективным инструментом для автоматизации экспериментальных исследований в механике разрушения и неразрушающего контроля.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 25-21-00272).

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

И. Ю. Литовченко^а, С. А. Аккузин^а, Н. А. Полехина^а, В. В. Осипова^а,
А. В. Ким^а, В. М. Чернов^б

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

^б АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара», 123098, ул. Рогова, 5а, г. Москва, Российская Федерация

Методом вакуумной индукционной плавки получена модифицированная малоактивируемая аустенитная сталь Fe–9Cr–27Mn–W–V–Ti–Ta (вес плавки 26 кг). Проведен электрошлаковый переплав и горячая ковка для получения сутунки. Исследованы особенности микроструктуры и механические свойства новой стали в закаленном (1100 °С, 1 ч) и холоднодеформированном состоянии (прокатка 20%). Показано, что микроструктура новой стали подобна микроструктуре ранее исследованных малоактивируемых аустенитных сталей системы Fe–11Cr–27Cr–W–V–Ti. При этом, уменьшение в составе стали хрома и углерода способствовало уменьшению доли карбидов $M_{23}C_6$ (M – Cr, W, Si). Электрошлаковый переплав привел к уменьшению объемной доли и размеров карбидов MC (M – Ti, V, Ta). Механические свойства новой стали сопоставимы, или превышают соответствующие значения для исследованных ранее сталей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00802-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00802/>.

ПРЯМАЯ ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Я. В. Вяткин, П. В. Трусов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990,

Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Современные способы обработки металлов и сплавов реализуются в основном в условиях интенсивного неупругого деформирования. Для анализа и проектирования таких процессов необходимы конститутивные модели, способные описывать эволюцию внутренней структуры материала, от состояния которой зависят эксплуатационные свойства готовых изделий. Наиболее перспективным направлением является многоуровневое моделирование, базирующееся на физических теориях пластичности. В частности, подходы прямого моделирования деформирования поликристаллических агрегатов открывают возможности детально изучать такие явления, как влияние внутренних и внешних границ кристаллитов, образование новых свободных поверхностей и изменение их свойств в рамках решения нелинейных краевых задач с контактными условиями, возникающих, в том числе, при анализе процессов механической обработки.

В работе используется конститутивная модель, учитывающая дислокационное скольжение по кристаллографическим системам, ротации решётки, нелинейное анизотропное упрочнение с насыщением, влияние межзеренных и свободных границ на физические свойства материала. Проведено численное моделирование деформирования поликристаллических образцов, получены решения начально-краевых задач с помощью оригинального пользовательского программного обеспечения. Развиваемый подход применяется в рамках постановки динамических нелинейных краевых задач, решаемые разными численными методами (метод конечных элементов, метод сглаженных частиц), что позволяет глубже исследовать эволюцию состояния поверхностей при интенсивной деформации и резании.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №25-19-00785).

НЕУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ФТОРОПЛАСТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ГРАФЕНОВЫМ МАТЕРИАЛОМ

А. В. Зайцев^{а, *}, П. А. Лобанов^{а, **}, М. В. Банников^б, С. В. Уваров^б,

Н. С. Лукьянов^а

^а Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

^б Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

*a-zaitsev@mail.ru, **lobanov_pa_03@mail.ru

Разработана оригинальная семиэтапная программа, которая позволила исследовать механическое поведение функциональных фторопластов, наполненных графеновым материалом (ГМ), при «жестком» и «мягком» циклическом и квазистатическом активном нагружении и разгрузке. На поверхности образца в его рабочей области размещались четыре датчика акустической эмиссии (АЭ). Противоположная поверхность образца использовалась для высокоскоростного ИК-сканирования для исследования эволюции поля температур. Нагружение образцов из «чистого» и функциональных фторопластов, наполненных ГМ до концентрации 0,03; 0,3 и 3 % масс., осуществлено по разработанной программе с непрерывной записью *in situ* сигналов АЭ, поля температур и измерения активного сопротивления. Для всех образцов функциональных фторопластов был обнаружен эффект J. Kaiser. Эта общая фундаментальная закономерность поведения материалов при циклическом нагружении свидетельствует о достоверности всех полученных экспериментальных результатов при деформировании по разработанной программе. Получены новые результаты, иллюстрирующие значительное снижение тепловыделения при циклическом нагружении образцов из функциональных фторопластов с увеличением концентрации ГМ. Особенно показательное уменьшение диссипации энергии (от 3 до 10 раз) при 3 % масс. наполнении. Получены новые оценки для теплоемкости и результаты эволюции удельного сопротивления функциональных фторопластов, модифицированных ГМ, при *in situ* нагружении по разработанной программе.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАВНОВЕСИИ ПОЛОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТЯЖЕЛОГО ОРТОТРОПНОГО ЦИЛИНДРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕОДНОРОДНОГО БОКОВОГО ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ

А. В. Зайцев*, А. А. Фукалов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

*a-zaitsev@mail.ru

Получено новое аналитическое решение задачи о равновесии находящегося под действием неравномерного внешнего бокового давления, моделирующего нахождение на опоре, полого толстостенного тяжелого ортотропного цилиндра со свободной от нагрузок незакрепленной внутренней поверхностью. При интегрировании неоднородной системы уравнений Ламе в цилиндрических координатах метод разделения переменных позволил понизить размерность задачи. Симметрия нагрузки относительно диаметральной вертикальной плоскости и геометрическая симметрия цилиндра предопределили поиск решения в виде тригонометрических рядов по окружной с записью коэффициентов разложения с помощью обобщенных степенных рядов по радиальной координате. Площадь контактной поверхности цилиндра и основания предполагалась известной и неизменной, а реакция – заданной в виде квадратичной функции, на которую налагалось условие равенства ее интегральной суммы весу конструкции. Вклад реакции основания учитывался 25 слагаемыми в разложении по окружной координате, которое гарантировало сходимость по энергетической норме. Вопросы поточечной сходимости и оценка ее скорости требуют дополнительного исследования. Проанализировано распределение напряжений в поперечных сечениях цилиндров, на основе многокритериального подхода проведена оценка прочности по совокупности критериев. Обнаружены области, где разрушение по различным механизмам может быть инициировано.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 25–21–00442).

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 3D-БИОПЕЧАТНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОЛЛАГЕНА ИЗ ТКАНЕЙ МОРСКИХ ОБИТАТЕЛЕЙ

Д. И. Спорышева^а, И. В. Виндокуров^а, М. А. Ташкинов^а, Ю. В. Куликова^б

^аПермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990,

Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

^бБалтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 236041, ул. Александра Невского, 14,

г. Калининград, Российская Федерация

Биопечать представляет собой современную технологию формирования объемных конструкций из живых клеток и биоматериалов с использованием 3D-принтеров, основанную на послойном нанесении биочернил, которые обычно представляют собой составы на основе гидрогелей, биополимеров и клеточных компонентов. В данной работе был исследован альгинатный гидрогель с добавлением коллагена, полученного из тканей медуз и трёх видов рыб: салаки, сёмги и сельди. Целью исследования являлся подбор и оптимизация режимов 3D-биопечати с использованием таких коллагенов, а также изучение механических свойств получаемых образцов. Основными варьируемыми параметрами печати являлись скорость экструзии, температура сопла и рабочей платформы. Кроме того, исследовалось влияние вязкости гидрогеля на качество печати.

Была выполнена оценка геометрических характеристик полученных изделий до и после воздействия отвердителя, а также исследована степень провисания гидрогеля при печати мостовых структур. Механические свойства определялись в ходе испытаний на растяжение в стандартных условиях. Было установлено влияние состава коллагена влияет на вязкость и процесс экструдирования, а также на коэффициент усадки образцов.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2025-0001).

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ КРЕПЛЕНИЯ КАНАТА НА СПЕКТР ЕГО ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

К. Р. Муратов, А. Л. Ваганов, Р. А. Соколов, Н. Д. Бузолин,
М. А. Осинцева

Тюменский индустриальный университет, 625000, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, Российская Федерация

Ранее выполненные нами исследования показали вклад изгибной жесткости каната на спектр его поперечных колебаний. Также учтен вклад крепления, которое в классической задаче представляется шарнирным, тогда как в действительности консольное. Предложено обобщение этих двух вариантов введением безразмерного коэффициента s – «шарнирная гибкость», который равен нулю для консольного крепления и единице для шарнирного. Этот коэффициент был введен технически, без какого-либо физического обоснования. В настоящей работе предложена упругая модель крепления, которая представляет собой шарнир с упругой реакцией на поворот закреплённого в нем каната. Эквивалентом шарнирной гибкости здесь является податливость шарнира S_2 , которая равна нулю для консольного крепления и бесконечности для шарнирного.

Модельные вычисления позволили предложить способ оценки коэффициента S_2 , который заключается в профилировании амплитуды колебаний вблизи крепления несколькими синхронными акселерометрами. Для проверки предложенного метода были выполнены лабораторные испытания на стальном канате диаметром 8 мм. Регистрацию колебаний выполнили с помощью восьми акселерометров на базе микросхемы ADXL335, подключенных к многоканальному модулю АЦП Е14-440. Результаты эксперимента подтвердили приложенную методику.

Работа выполнена в рамках Программы развития ТИУ (грант №5010/НПК от 15.12.2025, проект «Диагностический комплекс вибрационной диагностики стальных канатов»).

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПРЯМОМ ЛАЗЕРНОМ ВЫРАЩИВАНИИ

М. А. Гулов, И. С. Герцель, А. Г. Маликов, Е. И. Антонова

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090,

ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, Российская Федерация

В настоящее время никелевые жаропрочные сплавы преобладают в сфере производства деталей горячей части энергетических установок ввиду высоких механических характеристик и возможности их эксплуатации при экстремально высоких температурах. Актуальной проблемой является износ данных деталей. Наиболее оптимальным методом их восстановления является метод прямого лазерного выращивания. В зависимости от локализации повреждений, восстановительный ремонт может проводиться как для рабочих поверхностей, так и для тонкостенных элементов. В качестве материала для наплавки наиболее распространенными в данной сфере являются сплавы серии Inconel.

В настоящей работе в рамках создания технологии восстановления элементов энергетических установок исследовано влияние условий кристаллизации никелевых жаропрочных сплавов серии Inconel, получаемых методом прямого лазерного выращивания, на трещинообразование, структуру и фазовый состав формируемого материала. Установлено, что изменение градиента температур в ходе лазерной наплавки влияет на характер кристаллизационных процессов, что обуславливает формирование структуры, отличной от наблюдаемой в стандартных условиях.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Научное обоснование и создание инфраструктуры на основе использования синхротронного излучения для диагностики функционально-градиентных материалов» (Соглашение № 075-15-2025-459).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ И МЕХАНИЧЕСКОГО ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ФИЛАМЕНТА ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ-ГЛИКОЛЯ (РЕТ-G)

**Р. Р. Исхужин, Ю. М. Кожевникова, М. В. Малых, Э. Р. Мухамедьянов,
Ю. Г. Смирнов**

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики им. Академика Е.И. Забабахина, 456770, ул. Васильева, 13, Челябинская обл. г. Снежинск,
Российская Федерация

Стабильность и воспроизводимость свойств исходного сырья является одним из необходимых условий обеспечения качества изделий ответственного назначения, производимых методами аддитивных технологий. Действующий ГОСТ Р 59100-2020, регламентирующий внешний вид, геометрические параметры филамента, показатель текучести расплава и массовую долю воды, не предполагает контроля качества исходного сырья достаточного для обеспечения стабильности технологического процесса печати. В данной работе проведена оценка диагностической значимости двух методов для входного контроля филамента РЕТ-G: дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и механического испытания на растяжение. Показано, что ДСК эффективно выявляет отклонения в термических характеристиках полимера (фазовые и релаксационные переходы, значения температур этих переходов), в то время как механические испытания дают возможность оценить прочностные характеристики филамента. Определен перечень ключевых физико-механических характеристик для проведения входного контроля данного материала, также для прочностных характеристик установлены статистически обоснованные допустимые диапазоны их значений.

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ГОРЯЧЕГО И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ

А. И. Швейкин, Э. Р. Шарифуллина, А. А. Вшивкова, К. А. Романов,
Н. С. Кондратьев, В. Э. Вильдеман, С. А. Оглезнева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Комсомольский проспект,
29, г. Пермь, Российская Федерация

Для совершенствования существующих и разработки новых технологий формования изделий из металлов и сплавов необходимы модели материалов, позволяющие описывать изменение их структуры.

Предлагаются модификации многоуровневых конститутивных моделей алюминиевых сплавов, включающие описание горячего и сверхпластического деформирования, переходных режимов, путем детального учета динамической рекристаллизации, зернограничного проскальзывания и взаимодействия дефектных субструктур, влияния легирующих добавок, обобщения моделей на случаи повышенных температур и произвольного изменения температурно-скоростных условий. Были проведены экспериментальные, материаловедческие исследования и моделирование сверхпластического деформирования из современного российского промышленного алюминиевого сплава 1565ч при различных условиях; установлено, что модель позволяет описать экспериментальные закономерности при разных сценариях деформирования.

Разработан пакет модулей, реализующий созданные многоуровневые конститутивные модели, интегрируемый с решателями краевых задач МДТТ методом конечных элементов. Проведено моделирование формования изделий из сплава 1565ч.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00747, <https://rscf.ru/project/25-19-00747/>.

АНИЗОТРОПИЯ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ДИФФУЗИОННО СВАРНЫХ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Саркеева

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001, ул. Ст. Халтурина, 39, г. Уфа,
Российская Федерация

Материалы, представляющие собой слоистые композиции, могут демонстрировать превосходные свойства и, в то же время, характеризоваться их анизотропией. Для обеспечения надежности конструкций при их проектировании необходимо учитывать анизотропию физико-механических характеристик. Ударная вязкость, являясь функцией и прочности, и пластичности, является одной из наиболее чувствительных к анизотропии характеристик.

В данной работе представлены результаты исследования слоистых материалов, полученных диффузионной сваркой. Этот процесс твердофазного соединения материалов на атомарном уровне за счёт взаимной диффузии широко применяется для соединения титановых сплавов, а также совмещение со сверхпластической формовкой позволяет создавать многослойные конструкции ответственного назначения, обладающие высоким ресурсом.

Оценку анизотропии ударной вязкости проводили в зависимости от направления вырезки образцов, а также от расположения поверхностей соединения относительно направления действующей нагрузки. Механические испытания проводили на копре с записью диаграмм ударного нагружения, что позволило количественно определить работу зарождения и работу распространения трещины, изучить стадийность разрушения и выявить механизмы повышения ударной вязкости.

**МЕТОД РАСЧЕТА КИНЕМАТИКИ ЗВЕНЬЕВ
ШАРНИРНО – РЫЧАЖНОГО ГЕНЕРАТОРА КОЛЕБАНИЙ
МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ БЛАГОНРАВОВА**

А. В. Юркевич, В. А. Солдаткин, А. В. Терешин

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

Многопоточная механическая импульсная бесступенчатая передача Благонравова имеет в своем составе механизм, преобразующий однонаправленное вращательное движение ведущего вала в колебательное движение внутренних звеньев с заданной амплитудой – генератор колебаний. С кинематической точки зрения этот механизм является самым сложным. Наиболее распространенной и компактной конструкцией, обеспечивающей высокую нагрузочную способность, обладает генератор на основе четырехзвенного шарнирно - рычажного механизма.

Любой такой механизм состоит из звеньев и шарниров. Звенья механизма направлены вдоль прямых линий, которые методами аналитической геометрии могут описываться линейными уравнениями. Свойства уравнений линий используются для расчета кинематики звеньев. Угловым коэффициентом уравнения линии равен тангенсу угла наклона соответствующего звена, определяющего его положение на координатной плоскости. Предложено название метода – метод угловых коэффициентов, позволяющий последовательно решать классические задачи кинематики механизмов: о положениях, о скоростях, об ускорениях шарниров и звеньев механизма.

Апробация метода выполнена для расчета кинематики звеньев генератора колебаний пяти поточной механической бесступенчатой передачи Благонравова оформленных в виде расчетных модулей в среде MathCAD.

Предложенный подход дает возможность разработать метод для определения не только кинематических, но и силовых параметров, действующих в элементах многозвенных шарнирно - рычажных механизмах.

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1441

И. Е. Витошкин, А. Г. Маликов, К. В. Захарченко, Е. В. Карпов

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,
Российская Федерация

В данной работе рассматриваются циклические и статические механические свойства лазерных сварных соединений алюминий-литиевого сплава 1441. Актуальность работы заключается в необходимости поиска замены заклёпочного соединения другими методами соединения для снижения массы авиационных конструкций. Лазерная сварка обеспечивает нулевое увеличение массы при значительно более высокой производительности.

В работе показано, что лазерные сварные соединения обладают более высоким сопротивлением усталости, чем заклёпочные соединения, применяемые в авиации. Число циклов до разрушения значительно превышало это значение для заклёпочных соединений (взято из литературы). Например, при $\sigma_{\max} = 157$ МПа, $R = 0$ сварные соединения разрушались при среднем числе циклов $\sim 7,6 \cdot 10^4$, тогда как заклёпочные соединения разрушались после $\sim 10^4$ циклов ($\sigma_{\max} = 130$ МПа, $R = 0,05$). Сплав 1441 при этом разрушался после $\sim 2,8 \cdot 10^5$ циклов при $\sigma_{\max} = 157$ МПа, $R = 0$. Термическая обработка сварных соединений позволила увеличить количество циклов до их разрушения при $\sigma_{\max} = 157$ МПа, $R = 0$ до $\sim 1,4 \cdot 10^4$.

Таким образом, было показано, что лазерные сварные соединения значительно превосходят заклёпочные по сопротивлению циклическому разрушению.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 23-79-00037).

НОВОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИАГРАММЫ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Д. И. Вичужанин

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

Характеристикой предельной пластичности материала является степень деформации сдвига Λ_p , накопленная к моменту разрушения в условиях монотонной деформации. Данный параметр является важной составной частью несвязанных феноменологических моделей поврежденности. В большинстве случаев предельная пластичность является функцией коэффициента напряженного состояния k и коэффициента Лоде-Надаи μ_σ , либо коэффициента трехосности и угла Лоде. Отечественными и зарубежными авторами предложено значительное количество подобных функциональных зависимостей. Однако, все они имеют различного рода недостатки, не позволяющие адекватно описывать реальные пластические свойства материалов. В связи с этим использовать их в общем случае напряженно-деформированного состояния затруднительно.

В работе предложена зависимость предельной пластичности материалов, которая не имеет приведенных выше недостатков и может быть использована для определения предельной пластичности материалов в широком диапазоне параметров напряженного состояния. Совместно с моделью поврежденности она может быть использована для оценки деформационной способности металлических материалов в процессах пластического формоизменения.

РАЗВИТИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ

М. Н. Балдин, П. В. Трусов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Комсомольский проспект,
д. 29, Пермский край, г. Пермь, Российская Федерация

Для повышения вычислительной эффективности математических моделей при описании технологических процессов термомеханической обработки металлов и сплавов методами пластического деформирования с учетом необходимости явным образом учитывать эволюцию внутренней структуры предлагается комбинированный подход к решению соответствующих краевых задач. Подход основан на совместном использовании макрофеноменологической и многоуровневой физически-ориентированной конститутивных моделей материала. Основная идея подхода заключается в решении краевой задачи на уровне конструкции с применением вычислительно эффективной математической модели с макрофеноменологическим определяющим соотношением с последующей передачей воздействий и уточнением отклика для выделенных подобластей с применением многоуровневой конститутивной модели.

Одной из проблем, которые возникают при реализации комбинированного подхода, является существенное отличие в отклике между решениями для выделенных подобластей, полученные с применением различных моделей материала. При постановке краевых задач для отдельных подобластей с использованием кинематических граничных условий вследствие отличия используемых в расчетах моделей материала будут отличаться и параметры напряженно-деформированного состояния, а следовательно – не выполняться условия сопряжения на поверхности раздела по контактными напряжениям. Для решения данной проблемы была разработана специальная итерационная процедура, которая позволяет с требуемой точностью удовлетворить условиям сопряжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №25-19-00785).

ОПТИМИЗАЦИЯ БИОПОДОБНОЙ РЕШЕТЧАТОЙ СТРУКТУРЫ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА АНТЕННЫ

А. В. Азаров^а, Д. Д. Власов^б

^а Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, ул. 2-я Бауманская, д. 5,
с. 1, г. Москва, Российская Федерация

^б Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, пер. Малый Харитоньевский, 4, г. Москва,
Российская Федерация

В работе рассмотрена конструкция композитного параболического рефлектора космической антенны. Использование биоподобных решетчатых структур при проектировании рефлекторов позволяет существенно снизить массу конструкции по сравнению с традиционными монолитными зеркалами антенн при сохранении высокой жесткости, термостабильности и точности формы. Другое важное преимущество таких конструкций, состоящих из однонаправленных композитных ребер, заключается в возможности их изготовления непосредственно в космическом пространстве за счет использования аддитивных технологий 3D печати композитов, армированных непрерывными волокнами.

Анализ эффективности решетчатых конструкций рефлектора космической антенны проводился при моделировании воздействия внешних факторов, характерных для условий изготовления и эксплуатации конструкций на орбите: инерционные и вибрационные нагрузки, а также температурное воздействие (-60...+140°C). Численный расчет методом конечных элементов проводился для трех типов биоподобных структур решетчатой оболочки: изогридной; с ребрами, расположенными вдоль главных напряжений (типа «Паутина»); и с расположением ребер, полученным в результате топологической оптимизации. Рассчитанные деформации решетчатых структур сравнивались с полученными для сплошного рефлектора. Была показана эффективность и перспективность использования биоподобных принципов проектирования подобных конструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, Соглашение № 075-15-2025-646.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ AISI 420 ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

В. П. Кузнецов, И. А. Воронцов*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, ул. Мира, 19,
Екатеринбург, Российская Федерация
*igor.vorontsov@urfu.ru

Исследовано формирование легированного поверхностного слоя стали AISI 420 при обработке трением с перемешиванием твердосплавным инструментом WC-Co со сферической рабочей частью. Выполнено аналитическое моделирование температурно-временных характеристик термического цикла и рассчитан эффективный диффузионный путь вольфрама в аустените для скоростей подачи инструмента 50, 75 и 100 мм/мин. Показано, что снижение подачи увеличивает длительность аустенизации с 7,5 до 32,3 с и сопровождается ростом эффективного диффузионного пути W от 2,5 до 17,5 мкм. Экспериментальные оценки диффузионного пути составили $\leq 2,5$, 6,2–7,5 и 17,0–18,5 мкм, что согласуется с результатами моделирования.

СЭМ-анализ поперечных сечений показал, что при снижении величины подачи инструмента возрастают глубины зоны перемешивания и термомеханического воздействия, так при подаче 50 мм/мин они составляют 530 и 1420 мкм, а при 100 мм/мин 420 и 1080 мкм. Установлено, что частицы WC интенсивно внедряются у отступающей стороны, затем в процессе перемешивания перераспределяются к наступающей стороне, тем самым формируют полосы легирования. Исходные полиэдрические частицы со средним размером 1,7 мкм после внедрения измельчаются до 140–250 нм и приобретают околосферическую форму. Наибольшая сплошность легирования поверхностного слоя достигнута при подаче 50 мм/мин.

ВЛИЯНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ СПЕЧЕННЫХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Ф. Ильющенко, М. В. Лазарчик, А. Н. Роговой

Государственной научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа»,
20005, ул. Платонова,41, г. Минск, Беларусь

Для достижения необходимых значений коэффициента трения в материалы вводят фрикционные добавки. Считается, что кроме повышения уровня трения эти добавки должны удалять с поверхности сопряженной детали металл, переносимый со спеченной накладки, и образующиеся в процессе взаимодействия трущихся поверхностей пленки вторичных структур, с минимальным царапанием и изнашиванием. Однако, присутствие твердых износостойких включений в структуре материала, при неправильно подобранной их концентрации, может привести к обратному эффекту - повреждению и повышенному износу пары трения. При этом на сопряженных поверхностях образуются вырывы и трещины, борозды и области схватывания, распространяющиеся параллельно и перпендикулярно направлению скольжения, являющиеся следствием абразивного воздействия присутствующего в материале керамического компонента.

Основной задачей фрикционных добавок является не абразивный износ материала сопряженной детали, а обеспечение оптимального уровня зацепления с рабочей поверхностью контртела и сохранение ее оптимальных свойств. В связи с этим при выборе фрикционных компонентов необходимо в первую очередь обращать внимание на их твердость по сравнению с твердостью матрицы, форму и размер частиц.

ИЗГИБНАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

О. Ю. Волкова, Д. Д. Власов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, Малый Харитоньевский пер., 4, г. Москва,
Российская Федерация

Рассмотрена задача о повышении критической силы при изгибной потере устойчивости композитных стержней за счет непрерывного изменения их изгибной жесткости. Переменная изгибная жесткость задается локальным варьированием объемной доли армирующего наполнителя, что возможно при использовании композитных аддитивных технологий. При этом форма, вес и габариты стержня остаются неизменными. Для нахождения критической силы для стержня переменной жесткости используется численный метод начальных параметров, который был усовершенствован для учета низкой межслойной жесткости полимерных композитов. Закон изменения модуля сдвига по длине стержня за счет изменения объемной доли наполнителя определяется с помощью модели Чамиса для расчета эффективных свойств материала.

Был рассмотрен шарнирно опертый стержень прямоугольного сечения. Экспериментально определялись упругие характеристики компонентов (PLA-матрица, углеродная и базальтовая нити). Расчеты показали, что для углепластикового стержня переменной жесткости критическая сила возрастает по сравнению с эквивалентным стержнем постоянной жесткости на 18,5%, а для базальтопластикового – на 18,6%.

Результаты были верифицированы методом конечных элементов. Показана применимость разработанного алгоритма к задаче о повышении критической частоты вращения композитных намоточных валов.

Финансовая поддержка. Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ВАКУМНОЙ ИНФУЗИИ И ПРЯМОГО ПРЕССОВАНИЯ

А. А. Филиппов, К. Е. Первухин

Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

Одним из активно развивающихся направлений внедрения углеродных композиционных материалов (УКМ) является разработка конструкций и деталей биомедицинского назначения, а именно протезов стоп человека, позволяющих запасать и высвободить упругую энергию деформации (ESR-протезы). В рамках настоящей работы были получены опытные образцы УКМ и осуществлена экспериментальная оценка их упругих свойств, перспективных для использования в конструкциях протезах. Пластины УКМ изготовлены из листов однонаправленной и двунаправленной углеткани, пропитанной эпоксидной смолой по технологии инфузии в вакуумный мешок и прямом прессовании препрега. Из полученных пластин УКМ изготовлены и испытаны стандартные образцы на трехточечный изгиб (4x10x80 мм) для определения модуля упругости и предела прочности. Варьируя направление укладки соотношение различных типов слоев углеткани удается изменять модуль упругости от 18 до 150 ГПа. Проведена аналитическая оценка упругих свойств последовательным осреднением упругих свойств волокна и матрицы внутри одного слоя и осреднением упругих свойств слоев в материале, а также сравнение упругих свойств аналитических и экспериментальных для оценки применимости существующих моделей гомогенизации ортотропных УКМ для прогнозирования получаемых материалов. Рассмотренная модель осреднения свойств позволяет качественно прогнозировать упругие модули образцов УКМ при изгибе.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

И. Г. Емельянов

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

Тонкостенные элементы конструкций широко применяются в различных отраслях техники. Такие конструкционные элементы обычно работают под действием внешних механических и тепловых нагрузок, а иногда эксплуатируются при контакте с агрессивными водородосодержащими средами. Негативное влияние агрессивной среды на механические свойства металлов в процессе эксплуатации конструкций является одним из важных факторов, который определяет ресурс многих потенциально опасных объектов.

В работе предложены математические модели и алгоритмы для определения напряженного состояния и ресурса для стальных оболочечных конструкций, которые позволяют учитывать влияние агрессивной водородосодержащей среды.

Для определения ресурса стальных оболочечных конструкций, эксплуатируемых в водородосодержащей среде на первом этапе решается задача определения распределения температуры в оболочечном элементе. На втором этапе необходимо определить распределение концентрации водорода в элементе. На третьем этапе необходимо экспериментально получить диаграмму «напряжение-деформация» для материала конструкции. На четвертом этапе определяется напряжённое состояние конструкции. На пятом этапе определяется ресурс работы конструкции при различной термомеханической нагрузке и эксплуатации в агрессивной среде.

УПРОЧНЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ СЕВЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

М. М. Сидоров, А. Ю. Михайлов

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение
ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», 677980, ул. Октябрьская, 1, г. Якутск, Российская Федерация

Развитие инфраструктуры в Арктике требует эксплуатации сварных конструкций при температурах до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже. Сварка в условиях низких климатических температур приводит к значительному росту растягивающих остаточных напряжений, снижающих усталостную долговечность и хладостойкость соединений. Традиционные методы (термический отпуск) часто энергозатратны или неприменимы в полевых условиях. Актуальным является научное обоснование эффективных методов, таких как ультразвуковая ударная обработка (УУО), для экстремальных условий.

Цель работы – научное обоснование применения УУО для управления остаточными напряжениями в поверхностном слое сварных соединений северного исполнения путём экспериментального исследования её эффективности при различных температурах сварки и режимах обработки.

Экспериментально исследована эффективность УУО для трансформации остаточных сварочных напряжений в зоне термического влияния сварных соединений из стали 10ХСНД-3, выполненных при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Показано, что УУО (26 кГц, 340–500 Вт) во всех режимах обеспечивает полную трансформацию растягивающих напряжений в сжимающие. Наиболее высокий уровень сжимающих напряжений (до -337 МПа при комнатной сварке и до -308 МПа при низкотемпературной) достигается при обработке после полного остывания соединения.

Полученные результаты создают научную основу для целенаправленного формирования сжимающих полей остаточных напряжений в диапазоне $-250\text{...}-340\text{ МПа}$ и обосновывают выбор УУО в качестве энергоэффективной альтернативы термообработке для повышения долговечности сварных конструкций в экстремальных климатических условиях.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ, шифр проекта FWRS-2024-0034.

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CoCrFeNiAl(x)

Е. А. Путилова, К. Д. Малыгина

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

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) системы CoCrFeNiAl(x) представляют собой перспективный класс материалов, благодаря сочетанию высокой прочности, термической стабильности и коррозионной стойкости. Особенность сплавов этой системы заключается в том, что, изменяя содержание алюминия, можно управлять морфологией структурных составляющих и фазовым составом сплава. В данной работе исследовано влияние термической обработки и пластической деформации прокаткой со степенью обжатия 10% и 20% на магнитные свойства многокомпонентных сплавов системы CoCrFeNiAl(x) ($x = 0,8; 1,0$). Установлена прямая взаимосвязь количества ОЦК-фазы с намагниченностью в максимальном приложенном поле, а также степени деформации прокаткой, микротвердостью и коэрцитивной силой. Показана принципиальная возможность использования магнитных параметров (коэрцитивной силы и намагниченности в максимальном приложенном поле) в качестве информативных для разработки рекомендаций по применению методов магнитного неразрушающего контроля многокомпонентных сплавов системы CoCrFeNiAl(x).

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 25–29-00345. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОРФОЛОГИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ЧАСТИЦ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Al-4,5 (La,Ce), ПОЛУЧЕННОГО ЛИТЬЕМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР

А. Е. Медведев, М. Ю. Мурашкин

Уфимский Университет Науки и техники, 450008, ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, Российская Федерация

Немаловажный вклад в свойства металлических сплав вносит морфология интерметаллидных частиц, которая напрямую влияет на уровень физико-механических свойств. В данной работе предлагается подход, который предполагает управление уровнем прочности и электропроводности за счет изменения протяженности межфазной границы в сплавах системы Al-(La,Ce), в которых отсутствует растворимость компонентов в твердом состоянии.

Одну часть образцов сплава Al-4,5 вес. % (La, Ce), полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор, подвергали сфероидизирующему отжигу (СО) при 550°C длительностью от 5 до 180 мин, что позволило сформировать интерметаллидные частицы $Al_{11}RE_3$ разной морфологии. Вторую часть образцов после СО подвергли деформации методом кручения под высоким давлением (КВД), третью часть после СО и КВД отожгли при температуре 280°C 1 час.

Показано, что протяженность межфазной границы Al/ $Al_{11}RE_3$, как один из количественно оцениваемых факторов, коррелирует со значениями микротвердости и электропроводности. После СО длительностью 10 и 15 мин (и последующей КВД) происходит локальный перегиб кривых изменения количественных характеристик структуры и физико-механических свойств. Наиболее вероятно, что этот перегиб связан с особенностями формоизменения нерастворимых интерметаллидных частиц в процессе отжига.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания № FRRR-2026-0006 (УУНиТ).

ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Fe, ПОЛУЧЕННЫХ ЛИТЬЕМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР

А. Е. Медведев, М. Ю. Мурашкин

Уфимский Университет Науки и техники, 450008, ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, Российская Федерация

Проводники выполненные в виде проволоки из сплавов системы Al-Fe, полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК), демонстрируют высокие показатели электрической проводимости, прочности и термостойкости при приемлемых значениях пластичности. Ранее было показано, что уровень их свойств является чувствительным, особенно в плане пластичности, к содержанию железа и морфологии образующихся при кристаллизации фаз алюминидов железа.

В рамках данного исследования был проведен ряд термических обработок (ТО), направленных на повышение пластичности проволоки из ЭМК сплава Al-0,5 вес. % Fe. Перед холодным волочением (ХВ) часть исходных литых прутков была подвергнута предварительному сфероидизирующему отжигу (СО) при 450°C в течение 30 мин, 60 мин или 120 мин. После ХВ со степенью деформации ~91 % часть образцов проволоки отжигали при 300°C и 350°C до 180 мин.

Из всех режимов ТО наименьшее влияние на прочностные свойства проволоки, полученной ХВ без предварительного СО, оказывает отжиг при 300°C. Отжиг при 350°C полученной без СО проволоки приводит к большему приросту пластичности, в проволоке с СО. Продолжительность СО не оказывает заметного влияния на прочность проволоки, однако заметно влияет на ее пластичность – с увеличением длительности предварительного СО, после ХВ и последующего отжига при 300°C или 350°C пластичность растет быстрее и достигает наибольших значений.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-19-00633, <https://rscf.ru/project/25-19-00633/>.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ИСХОДНЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СВС-КОМПОЗИТОВ С ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

Н. Б. Пугачева^а, К. А. Костицина^б

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

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

В последнее десятилетие интенсивно ведутся исследования в области структурной механики и реологии СВС-композиов, к таким материалам относятся композиты системы Fe-Ni-Ti-C-B, в которых матрицей является γ -твёрдый раствор никеля в решётке железа, а упрочняющими фазами - частицы карбида титана TiC и диборида титана TiB₂. Формирование композита происходит в результате экзотермической реакции $4Ti + C + B_4C \rightarrow 2TiC + 2TiB_2 + Q$, которая реализуется в смеси порошков, помещённых в стальной контейнер закрытого типа.

Исследования структуры композиов с разным соотношением порошков в исходной смеси показали, что при изменении содержания терморреагирующих компонентов (ТРК) от 15 до 50 мас. % среднее содержание бора, углерода и титана в композиах увеличивается за счёт образования бóльшего количества частиц TiC и TiB₂. При этом возрастает пористость композиов за счёт бурного протекания экзотермических реакций и активного газовыделения. Оптимальным является содержание ТРК в исходной смеси 30 мас. % с максимальной твёрдостью 60 HRC и минимальной пористостью. Во всех исследованных композиах обнаружены эвтектические структуры, представляющие собой механическую смесь γ -Fe и боридов Fe₂B. Участки эвтектического строения имеют наименьшую твёрдость - 530 HV 0,1, тогда в областях γ -Fe + TiC + TiB₂ она достигает 1100 HV 0,1.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 124020700063-3 на оборудовании ЦКП «Пластометрия».

ВЛИЯНИЕ ПОСТОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ DMLS-ОБРАЗЦОВ СПЛАВА ВТ6 НА УСТАЛОСТНУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

А. В. Корелин, Е. О. Параскивая*, В. П. Кузнецов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, д. 19, ул. Мира,

Екатеринбург, 620002, Россия,

*elizaveta.paraskivaia@urfu.ru

Анализ трещиностойкости и кинетики усталостного разрушения выполнен для образцов из сплава ВТ6 фирмы НОРМИН, изготовленных прямым лазерным спеканием DMLS на 3D-принтере DMP Flex 350, в четырёх состояниях: после печати, отжига и постобработок в дробеструйной камере стеклянными шариками, галтовки мелкими керамическими телами и горячего изостатического прессования (HIP). Рассмотрены три ориентации концентратора относительно направления построения: 0° , 45° и 90° .

По полученным в результате исследований диаграммам развития трещин $\Delta a(N)$, установлено, что после отжига, дробеструйной обработки и галтовки кинетика устойчивого роста трещины близка, а ресурс определяется ориентировкой построения. При построении 0° и 45° число циклов до разрушения на 30 % выше, чем при 90° . Наибольшее повышение трещиностойкости обеспечивает постобработка HIP. При ориентации построения 0° достигнут ресурс $1,35 \times 10^6$ циклов за счёт снижения внутренних дефектов и релаксации остаточных напряжений. Дробеструйная обработка и галтовка преимущественно модифицируют поверхность и не влияют на устойчивый рост трещин в объёме. Установлено, что высокое качество аддитивного производства не приводит к формированию внутренних дефектов. Влияние постобработок поверхностей сильнее проявляется на стадиях зарождения и раннего роста трещины.

ВЛИЯНИЕ МНОГОПРОХОДНОГО НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 08X18H10

И. В. Татаринцев, А. В. Сергеев, В. П. Кузнецов

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

Исследовано влияние многопроходного наноструктурирующего выглаживания (НСВ) рабочей поверхности образцов аустенитной нержавеющей стали 08X18H10 на усталостные и прочностные свойства.

По результатам испытаний на растяжение на универсальной испытательной машине Instron 3382 образцов после 1, 3, и 5 проходов НСВ установлено повышение значения предела прочности σ_B на 2,9 %, 3,6 %, 3,6 % и текучести $\sigma_{0,2}$ на 1,8 %, 3,7 %, 4,7 %, при уменьшении пластичности δ на 0,6 %, 7,1 %, 13,5 % относительно результатов испытаний образца с исходной поверхностью после точения, соответственно.

Фрактографический анализ изломов образцов после прочностных испытаний показал, что НСВ рабочей поверхности затрудняет движение дислокаций, тем самым, повышая сопротивление материала распространению трещин.

По результатам испытаний по схеме изгиб при вращении с параметром $R = -1$ образцов по ГОСТ 25.502-79 на машине МУИ-6000 установлено, что увеличение числа проходов НСВ с 1 до 5 обеспечивает рост энергии разрушения ($W_{нак}$) при фиксированном уровне напряжений. Также было выявлено повышение условного предела выносливости образца относительно исходного состояния рабочей поверхностей после точения на 4,4 %, 7,9 %, 12,8 % после 1, 3 и 5 проходов, соответственно.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕТОКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ РЕЛЬСОВ

С. П. Шляхтенков^а, Д. Б. Некрасов^б, А. А Попков^а, А. Ю. Коровченко^а,

М. А. Гуляев^а

^а Сибирский государственный университет путей сообщения ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация

^б АО «ЕВРАЗ», ул. Космическое шоссе, 16, г. Новокузнецк, 654042, Российская Федерация

Ускоренное развитие поверхностных трещин рельсов и их взаимодействие приводит к появлению выкрашенных или поперечных трещин, уменьшению срока службы рельсового пути. Основной технологией удаления дефектного слоя с поверхности катания является рельсошлифование. Периодичность проведения шлифовки устанавливается действующей документацией в зависимости от категории пути. Техничко-экономический эффект шлифования, будет достигаться при удалении дефектов на ранней стадии. Для этого необходима достоверная количественная информация о размерах, местоположении и типе дефектов.

Цель работы - установление возможностей вихретокового метода контроля для количественной оценки стадии развития и классификации контактно-усталостных дефектов рельсов.

Степень развития сетки трещин не является интегральной характеристикой кривых участков пути. Необходима реализация сплошного контроля с использованием многоэлементных вихретоковых преобразователей и оценки параметров: верхней доверительной границы глубины и линейной плотности трещин. Показано, что удаление поврежденного слоя глубиной 0,3 мм на ранней стадии развития трещин снижает плотность сетки в 5 раз.

Экспериментально доказана возможность количественной оценки динамики развития трещин в эксплуатации вихретоковым методом. Предложены критерии предотказного состояния поверхности катания: предельная плотность сетки трещин 0,5 шт/мм, при которой начинается выкрашивание, а также критерий назначения шлифовки по диагностике внутренней нити кривых участков.

БИОПОДОБНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И 3D-ПЕЧАТЬ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. Э. Поляков, О. Ю. Волкова

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, Малый Харитоньевский пер., 4, г. Москва,
Российская Федерация

Создание композитных конструкций аэрокосмического назначения (антенных систем, платформ, сосудов давления) требует применения энергоэффективных технологий, обеспечивающих минимальную массу при высокой прочности и размерной стабильности. Перспективным решением является интеграция биомиметических принципов и аддитивных технологий 3D-печати композитных конструкций, армированных непрерывными углеродными волокнами. Ключевой проблемой процесса 3D-печати является образование дефектов (скручивание, обрыв волокна, пористость) при укладке по криволинейным траекториям с малым радиусом кривизны, что обусловлено неадаптивностью стандартных управляющих программ (G-кода) и приводит к деградации механических свойств изделий.

В работе проведен анализ влияния радиуса кривизны траектории на точность укладки волокна. Предложены методики адаптивного управления скоростью печати, предусматривающие ее динамическое снижение на участках с малой кривизной. Разработаны алгоритмы расчета локального расстояния между соседними траекториями равнонапряженных волокон для проектирования структур с переменной жесткостью. Показано, что использование предложенных подходов позволяет минимизировать дефекты, повысить точность позиционирования армирующих волокон и реализовать биоподобные (сетчатые, сотовые) структуры без заметной потери технологической эффективности процесса, что дает новые возможности для создания надежных композитных конструкций аэрокосмического назначения.

Финансовая поддержка. Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020.

РОЛЬ МИКРОГЕОМЕТРИИ В ОЦЕНКЕ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАР ТРЕНИЯ

И. Г. Горячева

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 119526, пр-т Вернадского, 101/1, г. Москва,
Российская Федерация

Поверхностная микрогеометрия контактирующих тел оказывает значительное влияние на контактную жесткость и трибологические характеристики (силу трения, износостойкость) пар трения. Именно неровности, образующие микрорельеф, вступают в контакт и определяют реальные контактные характеристики (фактические площадь контакта и контактные давления), которые могут существенно отличаться от номинальных (осредненных по поверхности) характеристик. Внутренние напряжения также концентрируются вблизи пятен контакта, что создает неравномерное поле напряжений в приповерхностных областях. Как следствие, даже при относительно небольших номинальных давлениях реальные напряжения могут приводить к пластическим деформациям и образованиям микротрещин в тонком поверхностном слое, соизмеримом с радиусом отдельного пятна контакта. Всё это необходимо учитывать при анализе контактного взаимодействия тел с шероховатыми поверхностями и оценке трибологических характеристик пар трения.

Разработан комплексный подход к исследованию контакта шероховатых деформируемых тел, позволяющий учесть влияние параметров шероховатости на распределение контактных и внутренних напряжений как на микроуровне (масштаб отдельного пятна контакта), так и на макроуровне (номинальная область контактного взаимодействия), а также предложить способы управления параметрами микрогеометрии поверхности с целью повышения трибологических характеристик исследуемых пар трения.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 25-11-00350).

РАЗРАБОТКА ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ДЛЯ РАБОТЫ В ВАКУУМЕ И ИНЕРТНЫХ СРЕДАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА

Е. В. Харанжевский^{а, *}, А. Г. Ипатов^б, А. В. Макаров^в

^а Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

^б Удмуртский государственный аграрный университет, Ижевск, Россия

^в Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*eh@udsu.ru

Актуальной проблемой общего машиностроения является разработка покрытий, обеспечивающих низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. Особенно это актуально для обеспечения работы узлов трения при граничных условиях смазки или в отсутствии смазки. Одной из важнейших областей применения таких покрытий является работа в условиях открытого космоса или в нейтральных (неокислительных) средах. Для обеспечения удовлетворительных триботехнических свойств обычно применяют комбинацию «твердая поверхность» — «мягкая поверхность». Традиционно применяют нормализованные или улучшенные стали, скользящие по антифрикционным сплавам на основе меди, олова или алюминия. Использование этих комбинаций материалов ограничено в динамических условиях эксплуатации, а их характеристики очень чувствительны к смазке. При недостаточной смазке сила сцепления, возникающая между телами скольжения, приводит к схватыванию и задиру поверхности, и пара трения быстро теряет работоспособность.

В докладе представлены способ получения, структура, механические и трибологические свойства сверхтвердых покрытий на основе карбида бора и гексагонального нитрида бора. Покрытия демонстрируют переход к режиму со сверхнизким коэффициентом сухого трения скольжения. Испытания проводились в условиях вакуума или в инертных средах при трении скольжения без смазки в сопряжении с различными контртелами.

Представленные в докладе результаты триботехнических испытаний позволили описать механизм формирования специального трибологического слоя, обеспечивающего переход к режиму сверхнизкого трения. В докладе представлены состав и механизмы формирования покрытий, обеспечивающих сверхнизкий коэффициент сухого трения скольжения во всем интервале условий проведения испытаний. Данные покрытия обеспечивают стабильность работы пары скольжения без смазки при работе в широком диапазоне температур и длительных испытаниях.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПОЗИТНЫХ БАЛОК ПРИ ИЗГИБЕ

Т. Д. Баландин, Д. Д. Власов, Д. В. Чернов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, Малый Харитоньевский переулок, д.4, Москва,
Российская Федерация

Проведение мониторинга состояния изделий, изготовленных с использованием аддитивных технологий, является актуальной задачей технической диагностики. Для решения поставленной задачи могут быть использованы системы акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга, основанные на явлении генерации упругих волн при образовании и развитии повреждений в материале контролируемых изделий. Оценка степени поврежденности изделий из композиционных материалов в основном осуществляется по сопоставлению значений энергетических и спектральных критериев, предельные значения которых определяют по результатам предварительных испытаний. Для проведения акустико-эмиссионного мониторинга композитных балок, изготовленных с помощью аддитивных технологий, разработан алгоритм многофакторной классификации, основанный на применении моделей логистической регрессии. Данный подход позволяет разделить поток зарегистрированных импульсов без использования априорной информации о предельных значениях АЭ параметров.

Для оценки работоспособности предложенного подхода проведена серия экспериментальных исследований напечатанных композитных балок по схеме трехточечного изгиба до разрушения. По динамике изменения весового содержания сегментированных импульсов АЭ определены предельные значения нагрузок, соответствующие переходу между преобладающими механизмами разрушения на каждом этапе нагружения. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения механических характеристик и проведения мониторинга состояния композитных изделий, изготовленных с использованием аддитивных технологий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, Соглашение № 075-15-2025-646.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ КООРДИНАТНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Т. Д. Баландин, Д. В. Чернов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, Малый Харитоньевский переулок, д.4, Москва,
Российская Федерация

Одной из ключевых задач технической диагностики является достоверное определение местоположения развивающихся повреждений. Для решения существующей научно-технической задачи используют системы акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга. Построение координатной локации источников АЭ с помощью стандартных алгоритмов осуществляется по значениям разности времен регистрации акустических сигналов преобразователями локационной группы. Существующие подходы не учитывают влияние крутизны переднего фронта, частоты дискретизации измерительного тракта и дисперсионных свойств на временные и энергетические АЭ параметры. Перечисленные факторы оказывают существенное влияние на точность построения координатной локации.

Для минимизации погрешности координатной локации источников АЭ могут быть использованы модели регрессионного анализа, позволяющие определить нелинейные закономерности между параметрами зарегистрированных импульсов и погрешностью построения координатной локации. По результатам экспериментальных исследований установлена корреляционная зависимость скорости распространения от амплитуды импульсов АЭ. Для компенсации временных задержек между преобразователями локационной группы предложена регрессионная модель, синтез которой осуществлялся с помощью метода наименьших квадратов по значениям амплитуды и усредненной частоты выбросов. Совместное применение регрессионных моделей позволило повысить вероятность выявления источников АЭ с 0,36 до 0,71.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020.

ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСКОПИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ КЛЕТОК ПРИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЯХ И В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, ул. Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

Статистическая термодинамика дефектов- «открытых состояний» в ансамбле ДНК позволила установить специальный тип критических явлений (структурно-скейлинговые переходы), связывающий нелинейную динамику открытых комплексов в различных сценариях экспрессии генов. Коллективные моды «открытых состояний» имеют природу автомодельных решений и могут рассматриваться как механизм, связанный с динамикой экспрессии генов, транскрипции и деления клеток. Показано, что динамика «открытых состояний» может быть ассоциирована с «пластичными» состояниями нормальных клеток и «квасихрупкими» состояниями раковых клеток с соответствующей динамикой экспрессии. Установленные закономерности «критичности» в поведении «открытых состояний» использованы для интерпретации оригинальных экспериментальных данных прижизненной динамики клеток, полученных методом лазерной (интерференционной) микроскопии. Анализ флуктуаций «фазовых толщин» позволил установить существование мультифрактальных спектров для нормальных (пластичных) клеток и монофрактальный для «охрупченных» раковых клеток. Анализ влияния внешних сил на динамику клеток позволил предложить объяснение изменения фенотипов в условиях микрогравитации. Результаты анализа прижизненной динамики клеток сопоставлены с данными обработки флуктуаций температурного поля, установившими признаки мультифрактальности для здоровой ткани и монофрактальности для ткани с онкологическими патологиями.

Исследования поддержаны государственным контрактом № 124020200116-1.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЗОНЫ МАКСИМАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ УГЛЕПЛАСТИКА ВДОЛЬ ОБРАЗЦА ПРИ ПОВТОРНОМ РАСТЯЖЕНИИ

П. Б. Северов

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 101000,
Малый Харитоньевский переулок, 4, г. Москва, Российская Федерация

В докладе предпринята попытка по результатам акустической эмиссии (АЭ) показать наличие пространственно-временной миграции области максимальных повреждений углепластика при повторном квазистатическом растяжении образца в условиях стесненной деформации. Экспериментально доказана пространственно-временная миграция области максимальных повреждений однонаправленного углепластика при одноосном повторном квазистатическом растяжении образца в направлении максимальной жесткости в условиях стесненной деформации. При помощи метода акустической эмиссии установлено перемещение области максимальных повреждений углепластика вдоль образца до места окончательного разрушения. Среднее значение координат источников АЭ в каждом цикле нагружения возрастает от 54,2 мм в первом цикле до 60,5 мм в девятом цикле нагружения. Наилучшее приближение $x = 65,5$ мм к месту окончательного разрушения образца $x = 64,5$ мм получено осреднением координат источников АЭ за последнюю секунду до разрушения.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020.

МЕХАНИКА ПОЛИМЕРНЫХ 3D-ПЕЧАТНЫХ ГИЛЬЗ ЭКЗОПРОТЕЗОВ С ЛОКАЛЬНЫМ АРМИРОВАНИЕМ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ

Д. А. Долгих, М. А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Комсомольский проспект,
29, г. Пермь, Российская Федерация

Исследование посвящено повышению структурной целостности 3D-печатных ортопедических трансбиальных экзопротезных гильз посредством интеграции непланарного армирования с использованием структурированных прутков из непрерывного углеродного волокна, реализованного через многоосевое аддитивное производство. Разработанный подход сочетает передовые технологии печати с использованием композиционных материалов для создания персонализированных протезов с улучшенными механическими характеристиками. Численное моделирование с анализом прогрессирующего разрушения, включающее модели деградации свойств материала, продемонстрировало процесс накопления повреждений в изучаемых 3D-печатных конструкциях. Исследование проводилось поэтапно. На первом этапе анализировалась модель гильзы без армирования под типовыми нагрузками. Выявлены зоны повышенных напряжений, обусловленные неровной геометрией культы, где вероятность зарождения трещин максимальна. Для их усиления разработан специальный алгоритм в среде Wolfram Mathematica. Показано, что локализованное армирование углеродными прутками эффективно усилило высоконагруженные зоны протезов. Предложен метод повышения прочности изделий за счет подбора внутренней архитектуры встроенных армирующих элементов в зонах концентрации напряжений. Разработанный подход позволяет упрочнять персонализированные гильзы со сложной геометрией, повышая их долговечность и комфорт для пациентов.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2024-0013).

ПОДБОР СОСТАВА ШИХТЫ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ЗАДАННОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

А. В. Мажарин, А. Р. Михно, И. А. Панченко, С. В. Коновалов

^а ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, ул. Кирова, 42,
г. Новокузнецк, Российская Федерация

В работе рассмотрена возможность получения наплавленного металла, близкого по химическому составу к эталонному образцу М0, выполненному промышленной проволокой Endotec Castoline при дуговой наплавке под флюсом на сталь 09Г2С в три слоя. Для исходного образца проведён химический анализ и построены карты распределения элементов, по которым определены целевые содержания углерода, хрома, молибдена, вольфрама, ванадия и марганца. Установлено, что эталонный металл характеризуется заметной химической неоднородностью и локальным обогащением отдельных участков карбидообразующими элементами. На основе полученных данных рассчитаны составы шихты для порошковых проволок М1–М3 с учётом диаметра проволоки 4,2 мм, параметров оболочки из ленты 08Ю и коэффициента заполнения около 45,8 %. Изготовленными проволоками выполнена наплавка в сопоставимых режимах, после чего проведён химический анализ полученных слоёв. Показано, что все разработанные варианты обеспечивают формирование наплавленного металла требуемого типа, а наибольшее приближение к эталону М0 по среднему содержанию Cr, Mo и W достигается для проволоки М3. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенного подхода к подбору шихты для формирования износостойкой наплавки с заданным химическим составом.

Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

**РАЗРАБОТКА СУРРОГАТНЫХ МОДЕЛЕЙ НА БАЗЕ
МНОГОУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ: ПРОВЕРКА
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОСЕТИ
LIMITED MINIMUM STATE CELLS**

П. А. Гладких, А. И. Швейкин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, ул. Комсомольский
проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Развитие аэрокосмической и машиностроительной отраслей диктует потребность в материалах с высокими физико-механическими характеристиками. Последние определяются состоянием структуры материала на различных масштабных уровнях. Для установления оптимальной внутренней структуры, обеспечивающей наилучшие эксплуатационные свойства изделий, применяются многоуровневые конститутивные модели (КМ) на основе физических теорий пластичности. К сожалению, использование этих детальных моделей напрямую в задачах оптимизации является вычислительно затратным. Одним из возможных решений данной проблемы является переход к суррогатным моделям, представляющим математическую аппроксимацию результатов физически обоснованных многоуровневых КМ. В докладе рассматривается применение рекуррентной нейросетевой архитектуры Limited minimum state cells для построения суррогатной модели на базе двухуровневой модели ГЦК-поликристалла, включающей описание внутризеренного дислокационного скольжения и ротаций зерен. Проведена оценка точности суррогатной модели и ускорения в расчетах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ZrO_2

Т. А. Симонова, А. Э. Трохачева, Н. Б. Пугачева

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

Критические элементы газотурбинных двигателей разрушаются при высоких температурах из-за растворения упрочняющих фаз. Для их защиты используются двухслойные термобарьерные покрытия с металлическим подслоем, наносимые плазменным методом; лазерная обработка поверхности применяется для повышения адгезии покрытия к подложке.

Объектом исследования были образцы из стали 20ХН4ФА с двухслойным покрытием: металлическим подслоем Ni-Cr-Al-Y и керамическим слоем $ZrO + 6\%Y_2O$, нанесёнными плазменным методом на установке УПН-60КМ ТСП2017 в атмосфере Ar+H₂. Лазерную обработку выполняли на комплексе Булат НТФ-150, структуру и химический состав исследовали в СЭМ Tescan Vega II ХМУ с ЭДС-приставкой INCA, топографию - профилометром Wyko NT1100.

При увеличении напряжения источника лазерного излучения, используемого для оплавления керамического покрытия, от 300 до 360 В увеличивается толщина оплавленного слоя. При напряжении 340 В зафиксировано максимальное содержание циркония при минимальном количестве кислорода. При напряжении 350 и 360 В на поверхности образцов с покрытием обнаружили железо и никель, что свидетельствует о переплавлении металлической подложки. С точки зрения повышения адгезионной связи между слоями предпочтительной является лазерная обработка при напряжении источника 340 В, поскольку в покрытии не наблюдаются трещины и поры по границе оплавленного и неоплавленного слоёв. Шероховатость поверхности после обработки лазером при напряжении 340 В минимальна и составила 7,3 мкм.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ПОСТОБРАБОТКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ZrO_2

Н. Б. Пугачева, А. Э. Трохачева

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

Термобарьерные покрытия на основе диоксида циркония, нанесенные наиболее экономичным методом плазменного напыления, часто характеризуются пористым строением и слабой адгезией к подложке. С помощью лазерной постобработки можно устранить эти недостатки. В настоящем исследовании анализируется влияние напряжения (U) и расположения фокуса относительно обрабатываемой поверхности (f) на толщину оплавленного слоя, элементный состав и шероховатость покрытия.

Термобарьерное покрытие наносили на образцы из стали 20ХН4ФА методом газоплазменного порошкового напыления. Первый слой NiCrAlY толщиной 100 мкм, внешний $ZrO_2 + 6 \text{ мас.}\% Y_2O_3$ толщиной 70 мкм. Лазерная постобработка выполнена на комплексе БУЛАТ НТФ-150 ($\tau=2$ мс, $f=10$ Гц, $v=1$ м/с; $f=0$ и $+5$ мм; $U=320, 340, 360$ В). Микроструктура и элементный состав проанализированы СЭМ Tescan Vega II XMU (EDS INCA), шероховатость определена на профилемере Wyko NT1100.

При $f=0$ мм толщина зоны оплавленного слоя растет с увеличением U за счет повышения тепловложения. Содержание циркония при этом увеличивается, а кислорода - снижается. Минимальная шероховатость поверхности $Ra=7,3$ мкм получена при $U=340$ В. При $f=+5$ мм толщина зоны оплавления уменьшается из-за дефокусировки; количество Zr снижается, кислорода растет, шероховатость $Ra=12,9$ мкм при $U=320$ В.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 124020700063-3 на оборудовании ЦКП «Пластометрия».

ВЛИЯНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКАФФОЛДОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЙ ОТКЛИК СИСТЕМЫ «КОСТЬ–ИМПЛАНТАТ»

В. М. Затонская, Н. В. Еленская, И. А. Пащенко, М. А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, Российская Федерация.

Эффективным инструментом для восстановления целостности костной ткани являются имплантаты на основе механических метаматериалов. Перспективным подходом проектирования скаффолдов (решетчатых структур) является использование трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП). Механические свойства таких структур можно адаптировать под необходимые свойства костной ткани за счет управления геометрией скаффолда.

Цель исследования – изучение влияния изменения архитектуры скаффолда на его механическое поведение при квазистатическом сжатии в условиях контактного взаимодействия с костной тканью. Для этого были рассмотрены структуры с различным диаметром поровых каналов и начальным искажением геометрии элементарной ячейки. Результаты показали корреляцию физико-механических свойств скаффолда с его внутренней архитектурой, как для всей структуры, так и в области контактного взаимодействия с костной тканью.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-79-00308).

МНОГОСЛОЙНЫЕ СДВИГОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧЕ НУССЕЛЬТА-КУЭТТА-ПУАЗЕЙЛЯ

К. В. Губарева^а, Е. Ю. Просвиряков^{б, в}

^а Самарский государственный технический университет, 443100, ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара,
Российская Федерация

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

^в Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620062, ул. Мира, 19,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

В работе анализируется стационарное ламинарное движение вязкой несжимаемой жидкости в зазоре между двумя параллельными пластинами. На верхней подвижной границе дополнительно к значению скорости задаются её первая и вторая производные по нормали, что позволяет описывать сложные пристенные эффекты, такие как скольжение или влияние тонких покрытий. Нижняя пластина неподвижна. Движение создаётся градиентом давления и силой тяжести. Получено точное решение полной системы уравнений Навье-Стокса в виде полинома девятой степени. На основе этого решения впервые доказано существование стационарных ламинарных течений с двумя и тремя внутренними нулями продольной скорости. Такие нули соответствуют поверхностям, где скорость меняет знак, что приводит к двухслойной и трёхслойной стратификации потока с чередованием направлений движения соседних слоёв. Установлены аналитические условия перехода от однонаправленного течения к двухслойному и затем к трёхслойному. Показано, что формирование дополнительных зон противотечения определяется конкуренцией между градиентом давления, движением верхней пластины и нелинейными слагаемыми в граничных условиях. Полученные результаты позволяют целенаправленно управлять структурой потока в микрофлюидных системах и технологиях нанесения покрытий.

ТЕРМОГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ТОНКОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ

К. В. Губарева^а, Е. Ю. Просвиряков^{б, в}

^а Самарский государственный технический университет, 443100, ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара,

Российская Федерация

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

^в Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620062, ул. Мира, 19,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

В приближении Буссинеска рассмотрена стационарная осесимметричная конвекция в тонком сферическом слое, вращающемся с угловой скоростью Ω . Из уравнений Навье-Стокса с учётом сил Кориолиса $f = 2\Omega \sin \theta$ и плавучести получено уравнение для широтной температурной функции $\Phi(\theta)$:

$$\frac{d^2\Phi}{d\theta^2} - \frac{d\Phi}{d\theta} \left(\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{d\theta} + \frac{1 + \cos^2 \theta}{\cos \theta \sin \theta} \right) + 8 \sin^2 \theta = 0.$$

Граничные условия: $d\Phi/d\theta = 0$ при $\theta = 0$ и $\theta = \pi/2$, нормировка $\Phi(\pi/2) = 1$. Численное решение методом стрельбы с регуляризацией сингулярностей показывает рост Φ от значения около 0,024 на экваторе до единицы на полюсе. Вертикальная скорость максимальна в средних широтах, что обеспечивает перенос тепла от экватора к полюсу. Температура имеет вид $T(\theta, z) = \Phi(\theta)/(1 - z/h)$, меридиональная и вертикальная скорости формируют замкнутую циркуляционную ячейку. Давление $P = P_0 - g\alpha h\Phi \ln(1 - z/h)$ возрастает с глубиной, а его горизонтальный градиент уравновешивается силой Кориолиса в геострофическом балансе. Невязка исходного дифференциального уравнения не превышает 10^{-16} .

Полученные результаты могут быть использованы для анализа дифференциального вращения в конвективных зонах звёзд и в планетных атмосферах.

РЕЛАКСАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ ПРИ РАВНОМЕРНОЙ ПРОДУВКЕ

К. В. Губарева^а, Е. Ю. Просвиряков^{б, в}

^а Самарский государственный технический университет, 443100, ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, Российская Федерация

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

^в Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620062, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Исследовано нестационарное течение вязкой несжимаемой жидкости между двумя бесконечными параллельными пластинами. Через обе границы поддерживается постоянная нормальная скорость (вдув или отсос). Нижняя пластина неподвижна, верхняя движется с постоянной скоростью вдоль своей плоскости. Вдоль канала действует постоянный градиент давления. Продольная скорость принята линейно зависящей от поперечной координаты, что позволяет свести трёхмерную задачу к двумерной. Методом разделения переменных получено точное аналитическое решение, описывающее эволюцию профилей скорости от состояния покоя до стационарного режима. Показано, что наличие поперечного потока ускоряет процесс релаксации. Это ускорение обусловлено появлением дополнительного демпфирующего слагаемого в уравнении для собственных функций после приведения задачи к самосопряжённому виду. Установлено, что характерное время выхода на стационар уменьшается с ростом безразмерного параметра продувки. Проанализировано затухание отдельных мод: высшие гармоники затухают быстрее низших, причём продувка дополнительно подавляет все моды. В пределе нулевой продувки решение переходит в классическое нестационарное течение Куэтта-Пуазейля. Полученные результаты могут использоваться для верификации численных методов и анализа переходных процессов в фильтрационных и мембранных устройствах.

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ПРОНИЦАЕМОМ КАНАЛЕ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПЕРЕПАДЕ ДАВЛЕНИЯ

К. В. Губарева^а, Е. Ю. Просвиряков^{б, в}

^а Самарский государственный технический университет, 443100, ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, Российская Федерация

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

^в Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620062, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Представлено точное решение уравнений Навье-Стокса для движения вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале с проницаемыми стенками. Вдоль канала действует градиент давления, содержащий постоянную и гармоническую составляющие. Через границы поддерживается постоянный нормальный поток жидкости. Продольная скорость линейно зависит от поперечной координаты, что соответствует однородному сдвиговому течению. С помощью метода комплексных амплитуд получены замкнутые аналитические выражения для стационарной и колебательной частей поля скорости. Показано, что поперечный поток существенно изменяет форму стационарного профиля: при вдуве градиенты скорости концентрируются у одной стенки, при отсосе – у другой. Для колебательной составляющей установлено, что глубина проникновения пульсаций скорости и их фазовый сдвиг зависят не только от частоты, но и от направления и интенсивности продувки. Положительная проницаемость (вдув снизу) увеличивает толщину колебательного пограничного слоя, тогда как отрицательная (отсос) уменьшает её. Амплитуда колебаний скорости линейно растёт с амплитудой пульсаций давления, причём форма профиля по высоте канала сохраняется. Решение охватывает предельные случаи чистого течения Пуазейля, чистого течения Стокса и стационарного течения с продувкой, что делает его удобным эталоном для тестирования численных алгоритмов.

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЗАДАЧИ С ДИССИПАЦИЕЙ В ПЛОСКОМ СЛОЕ

К. В. Губарева^а, Е. Ю. Просвиряков^{б, в}

^а Самарский государственный технический университет, 443100, ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара,
Российская Федерация

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

^в Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620062, ул. Мира, 19,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

В приближении Буссинеска построено точное решение связанной задачи о нестационарном конвективном течении вязкой несжимаемой жидкости в горизонтальном слое между двумя изотермическими пластинами. Учтены сила плавучести, зависящая от отклонения температуры, и диссипативная функция, описывающая необратимый переход механической энергии в теплоту. Поле скорости выбрано в виде сдвигового течения с линейной зависимостью продольной компоненты от поперечной координаты. Из условий совместности уравнений показано, что коэффициент поперечного сдвига должен быть постоянным во времени. Решение для скорости представлено как сумма стационарного профиля Куэтта-Пуазейля и бесконечного ряда экспоненциально затухающих мод, коэффициенты которого определяются из начальных условий. Температурное поле найдено в виде суммы стационарного распределения, обусловленного теплопроводностью и диссипацией, и нестационарной добавки, удовлетворяющей неоднородному уравнению теплопроводности. На примере воды показано, что вклад однородного сдвига в диссипацию сравним с вкладом градиента продольной скорости. Оба механизма приводят к дополнительному нагреву жидкости во всём объёме канала. Установлено, что время гидродинамической релаксации в число Прандтля раз меньше времени тепловой релаксации. Решение применимо для анализа переходных процессов в микротеплообменниках и системах охлаждения.

СТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ КУЭТТА С АСИММЕТРИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ НА ГРАНИЦАХ ПРОНИЦАЕМОГО КАНАЛА

К. В. Губарева^а, Е. Ю. Просвиряков^{б, в}

^а Самарский государственный технический университет, 443100, ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, Российская Федерация

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

^в Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620062, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Получено точное аналитическое решение для стационарного сдвигового течения вязкой несжимаемой жидкости между двумя параллельными пластинами. Через обе границы поддерживается постоянный нормальный поток жидкости (вдув или отсос). На нижней пластине задано условие частичного скольжения Навье, связывающее тангенциальную скорость с её нормальной производной. На верхней пластине действует классическое условие прилипания. Продольная скорость линейно зависит от поперечной координаты. Решение выписано в замкнутой экспоненциальной форме. Проведен анализ предельных случаев: при отсутствии проницаемости восстанавливается линейный профиль скорости со скольжением на нижней границе; при отсутствии скольжения получается экспоненциальное распределение для проницаемых пластин с прилипанием; при стремлении коэффициента скольжения к бесконечности (полное скольжение) течение становится однородным и совпадает со скоростью верхней пластины. На примере воды и минерального масла установлено, что определяющим параметром является произведение скорости продувки на высоту канала, делённое на кинематическую вязкость. Для маловязких жидкостей умеренный вдув вызывает сильное искривление профиля и может приводить к возникновению обратных течений вблизи нижней стенки. Для высоковязких жидкостей течение остаётся близким к классическому линейному даже при заметной продувке. Вычислены распределения касательных напряжений, необходимые для оценки нагрузок на граничные поверхности.

НЕОДНОРОДНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПУАЗЕЙЛЯ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ЖИДКОСТИ В НАКЛОННОМ СЛОЕ

Е. Ю. Просвиряков^{а, б}, А. В. Янковская^{а, б}

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

^б Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002,

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

Представлено новое точное решение системы уравнений Навье-Стокса, описывающее изотермическое неоднородное сдвиговое течение Пуазейля в наклонном бесконечном слое с учетом вертикальной завихренности. Слой наклонен под углом α к горизонтали, а проекции ускорения свободного падения на горизонтальные оси определяются углом β . Система уравнений, характеризующая исследуемое движение, получается переопределенной после редукции уравнений Навье-Стокса и уравнения несжимаемости. Получено аналитическое решение краевой задачи, описывающей неоднородное течение Пуазейля в классе точных решений, линейных по части переменных, Линия-Сидорова-Аристова.

Показано, что структура точного решения полностью аналогична структуре решения для горизонтального слоя. Установлено, что гравитационные проекции влияют на коэффициенты полиномов скоростей и тем самым способны изменить число противотечений в поле скорости по сравнению с горизонтальным случаем при тех же граничных условиях.

Кинетическая энергия потока однократно обращается в нуль внутри слоя и имеет немонотонный характер – аналогично горизонтальному случаю. Положение нуля кинетической энергии смещается под действием наклона слоя, что является характерным отличием данной задачи.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при моделировании течений в наклонных открытых каналах, при описании склоновых течений в геофизической гидродинамике, а также как тестовое точное решение для верификации численных методов расчета течений в наклонных слоях.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ SMART-МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ, ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ.

В. П. Матвеев, А. О. Каменских, С. В. Лекомцев, Г. С. Сероваев

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН, 614068,

ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

Smart-материалы представляют собой системы, состоящие из традиционных конструкционных материалов и компонент, которые выполняют роль сенсоров, актуаторов и элементов обработки данных. Эти материалы в зависимости от внешних условий могут выполнять различные функции, в том числе рассматриваемые в докладе управление геометрией деформируемых тел и управление их динамическими характеристиками. В качестве сенсоров рассматриваются волоконно-оптические датчики деформаций, а в качестве актуаторов - пьезоэлектрические материалы или материалы с памятью формы. Рассматриваются задачи, определяющие оценку достоверности значений деформаций, измеряемых волоконно-оптическими датчиками, встроенными в материалы. Приводятся математические постановки задач и численные результаты изменения геометрии деформируемых тел в результате реализации обратного пьезоэффекта или эффекта памяти формы соответствующими элементами, встроенными в материалы рассматриваемых тел. Для управления динамическими характеристиками конструкций на основе использования smart-материалов рассматриваются следующие задачи: о собственных и вынужденных установившихся колебаниях деформируемых тел с встроенными в материал пьезоэлементами, к электродированным поверхностям которых присоединены электрические цепи, состоящие из резисторов, емкостей, индуктивностей; о собственных и вынужденных установившихся колебаниях деформируемых тел при реализации напряженного состояния, инициируемого встроенными в материал элементами из пьезоэлектрических материалов или сплавов с памятью формы.

ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ

О. А. Плехов, А. Ю. Изюмова, М. Л. Бартоломей, А. Н. Вшивков

ИМСС УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь

В работе приведены примеры использования высокоскоростной (с характерными временами 100 нс) упруго-пластической деформации поверхности для повышения усталостного ресурса металлических элементов конструкций с концентраторами напряжений. Упруго-пластические волны инициируются абляцией поверхностного слоя металла вызванного интенсивным лазерным излучением (лазерной ударной обработкой - laser shock peening). Для практической реализации метода разработана экспериментальная установка на основе импульсного лазера с длительностью импульса 10 нс, реализующая метод на образцах произвольной геометрии. Для оптимизации эффекта обработки сформулирован и решён комплекс задач, включающий описание процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, распространения упруго-пластических волн, генерации остаточных напряжений и их влияния на циклическую долговечность и трибологические свойства пар трения.

С использованием построенной модели подобраны оптимальные режимы обработки образцов из титана ОТ-4 и Вт-6 с концентраторами напряжений. Экспериментально показано, что оптимальный режим обработки повышает усталостный ресурс образца с концентратором напряжения в 8 раз.

Отдельно рассмотрены вопросы обработки тонкостенных деталей сложной геометрии, например лопаток ГТД. Представлен способ одновременной двусторонней лазерной ударной обработки таких деталей. Показано, что при оптимальном подборе параметров данный метод позволяет избежать появления нежелательных растягивающих остаточных напряжений на поверхности, сохранить качество поверхности и геометрию детали, создавая при этом конфигурацию поля сжимающих остаточных напряжений, необходимую для повышения прочностных характеристик.

В заключении доклада проанализированы дополнительные возможные применения метода лазерной ударной обработки и показано, что его применение позволяет существенно улучшить типологические свойства пар трения в режиме сухого трения.

СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 09Г2С ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Ю. В. Худорожкова^а, С. В. Буров^а, А. М. Поволоцкая^{а, б}, Д. И. Вичужанин^а

^а ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

^б ИФМ УрО РАН, 620108, ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Обычно определение остаточного ресурса материала в элементах конструкций является проблематичным. Структурные превращения, протекающие в процессе деформации вызывают особый интерес. Локализация пластической деформации на различных масштабных уровнях связана с дефектами структуры соответствующего масштаба.

В данной работе для обнаружения зон локализации пластической деформации изучена структура, пластически деформированных образцов углеродистой стали после одноосного растяжения. Полученные в ходе работы результаты, позволяют судить об изменении типа дислокационной субструктуры и о деформации, которую испытал материал.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России для ИМАШ УрО РАН (по теме № 124020700063-3) и ИФМ УрО РАН (по теме «Диагностика» № 122021000030-1). При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ И ПОВОДОК ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

С. В. Буров, Ю. В. Худорожкова

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Термическая обработка лезвийных заготовок с неоднородной структурой по сечению приводит к короблению и поводкам. В ходе исследований были рассмотрены причины, приводящие к поводкам. Основными являются неравномерности в химическом составе и в структуре. Рассмотрены возможные мероприятия по снижению величины поводок при термообработке плоских заготовок.

Стальной лезвийный инструмент характеризуется повышенными требованиями к формфактору, при котором заготовки инструмента имеют очень небольшую толщину, чуть большую ширину при значительной длине. Для таких изделий, обычно из инструментальных высокоуглеродистых сталей, чаще всего легированных, характерны очень малые допуски на отклонение от геометрии. Пространственное отклонение от заданной геометрии, возникающее на стадии термической обработки, является достаточно распространенным дефектом.

В данной работе описаны результаты исследования структуры и магнитных характеристик заготовок из инструментальной стали с поводками, обусловленными обезуглероженным слоем.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАГНИТОСТРИКЦИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

А. Н. Мушников

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

Магнитострикция – это явление изменения геометрических размеров и формы ферромагнитных материалов под воздействием внешнего магнитного поля. Величина и характер зависимости магнитострикции от приложенного магнитного поля определяются не только химическим составом материала: микроструктурные особенности, такие как размер зерна, наличие дефектов, фазовый состав, а также внутренние и внешние механические напряжения, существенно влияют на магнитострикционные свойства материалов. Вследствие этого магнитострикция может служить чувствительным индикатором изменений в структуре и напряженном состоянии. Однако до настоящего времени зависимости магнитострикции не имели широкого применения в неразрушающем контроле ввиду того, что классические методы ее измерения требуют большого времени на подготовку объекта контроля или не позволяют проводить измерения на крупногабаритных изделиях. В докладе представлен обзор по данной теме, рассмотрены перспективы применения полевых зависимостей магнитострикции в неразрушающем контроле с учетом тенденций развития измерительной техники.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА Zn-0,47Li

Д. Е. Винокуров*, Д. Ю. Распосиенко, С. В. Афанасьев, Е. С. Белослудцева,
Д. И. Давыдов

Институт физики металлов УрО РАН, 620137, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург,
Российская Федерация
*dante9981@yandex.ru

В травматологии перспективно применение имплантатов из биорезорбируемых сплавов на основе Zn, способных полностью растворяться в организме человека без вреда, и, позволяющих избежать повторной операции по их удалению.

Остается актуальной проблема низких механических свойств Zn. Для повышения прочностных свойств предлагается Li, который совместно с деформационной обработкой способен повысить механические свойства.

Микроструктура сплава Zn-0,47Li в литом состоянии представлена матрицей из грубой эвтектики Zn+LiZn₄ (размер зерна ~1-2 мм) с крупным сегментом выделений первичной фазы LiZn₄, собранных в одной области. После гомогенизации (вакуум, 380°C, 60ч, охл. в воде) структура представлена преимущественно равноосными зернами (~200 мкм) эвтектики с более мелкой пластинчатой структурой внутри. За счет осадки (нагрузка 10 т) без дополнительного нагрева удалось получить микроструктуру, состоящую из равноосных зерен со средним размером ~1 мкм, что значительно меньше зерен в литом и гомогенизированном состояниях.

Значения твердости для литого, гомогенизированного и состояния после осадки составили 98, 118 и 96 HV, соответственно, т.е. не показали значительного изменения.

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.

ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Ce-Fe-Ni-Zr, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЛП

С. А. Кунавин^а, К. О. Базалеева^б, Ю. Ю. Понкратова^б, И. И. Бинков^б

^аЦентральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, 115088,

ул. Шарикоподошипниковская, 4, г. Москва, РФ

^бРоссийский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, РФ

^вМосковский государственно-технологический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, РФ

Проведено исследование механических характеристик жаропрочного алюминиевого сплава Al-5.5%Ce-5.8%Fe-1.1%Ni-0.7%Zr, полученного методом СЛП, при статическом и циклическом нагружении в зависимости от направления выращивания образцов (вертикальные-ВО, горизонтальные-ГО) и состояния их поверхности (необработанная и обработанная поверхность рабочей части образцов), а также исследованы особенности изменения структуры сплава при деформации. Экспериментальные образцы были синтезированы на установке СЛП-250.

Прочностные характеристики для всех вариантов образцов различаются незначительно ($\sigma_B \approx 400 - 430$ МПа). Пластические характеристики существенно различаются. Для ВО обработка существенно повышает значение относительного остаточного удлинения (δ) на 26-28%, горизонтальных – на ~80%. Пластические свойства горизонтальных образцов (ГО) (как в обработанном варианте, так и в исходном) значительно выше, чем у вертикальных.

Сопротивление усталости существенно возрастает для обработанных. Для ВО значения ограниченных пределов выносливости возрастают на ~ 12%, а по числу циклов – на ~ 80%. Для ГО этот эффект проявляется ещё более значительно: соответственно ~ (13-14)%, и ~ (180-200)%.

Исследование микрорельефа поверхности разрушения испытанных образцов показало, что для всех образцов реализуются вязкие механизмы разрушения. При статическом разрушении - ямочный рельеф и элементы локальной пластической деформации в виде волнистости на боковых поверхностях крупных ямок. Для циклически разрушенных образцов - вязкие усталостные бороздки.

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Н. С. Кондратьев, К. А. Романов, Д. С. Безверхий, М. Н. Балдин,
Э. Р. Шарифуллина, А. И. Швейкин, К. В. Остапович, А. Н. Подседерцев
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, пр. Комсомольский, 29,
г. Пермь, Российская Федерация

В рамках проведенного исследования были разработаны многоуровневые статистические конститутивные модели для описания деформирования при термомеханических воздействиях: фрагментации и рекристаллизации зерен, механизмов внутриверного дислокационного и зернограничного скольжения с учетом влияния легирующих добавок сплава. Также были разработаны прямые модели: с явным рассмотрением топологии зеренной структуры для описания механизма зернограничного упрочнения и определения возможных областей межкристаллитного разрушения; с явным рассмотрением включений для моделирования поведения материала при циклическом нагружении с целью выявления мест зарождения циклических трещин. С применением разработанных идентифицированных конститутивных моделей были получены результаты моделирования простых и сложных нагружений представительных объемов металлов и сплавов. Предложенные модели были реализованы в разработанном модернизированном программном комплексе, с его применением были решены краевые задачи для описания многостадийных технологических процессов изготовления и эксплуатации изделий с целью проектирования функциональных материалов-изделий, обладающих оптимальными для эксплуатации свойствами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002.

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ В СТРУКТУРЕ КОМПОЗИТНЫХ ТРИБОМАТЕРИАЛОВ

П. Г. Пыриков

Доктор технических наук, доцент, независимый исследователь, Россия, г. Брянск

Перспективы применения полимеров растительного происхождения в трибоматериаловедении рассматриваются в аспекте концепций возобновляемого использования древесины и древесного сырья на основе технологий глубокой переработки. Пористость ксилемы позволяет создавать композитные структуры на основе объемного насыщения электролитическими антифрикционными составами, обеспечивая тем самым различные трибоэффекты.

Определенный интерес представляет использование анатомического строения древесины в качестве моделирующего субструктуру формируемых композитов с заранее определенным сочетанием элементного состава. Такая структура после глубокой пропитки может быть мацерируемой, в результате чего образуется каркас из восстановленного металла, масштаб которого определяется размерами трахеид, сосудов и перфораций.

При последующем формообразовании, например, электролитическими способами, образуется резко гетерогенная структура композита, в котором присутствуют низко модульные материалы с высокой степенью релаксации динамических возмущений от рабочих процессов или же материалы, обладающие свойством памяти формы.

Мезомеханика разрушения таких материалов отличается резко выраженной анизотропией второго порядка, для которой характерно взаимовлияние образующихся фаз при технологическом управлении свойствами структуры. Определенных эффектов при этом удастся добиться при структурообразовании в условиях индуцирования внешними магнитными полями порядка нескольких Тесла.

ОСОБЕННОСТИ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБНОЙ ПРОДУКЦИИ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО СПЛАВА 02ХН30МДБ (ЭК-77) С ПРИМЕНЕНИЕМ ТПА 8-16"

Я. И. Космацкий^а, И. Н. Веселов^б, В. Н. Еремин^в, Н. Ю. Смолин^г,
К. Ю. Яковлева^а, П. Н. Нифантьев^а, Н. В. Фокин^а

^а ОП ООО «ИЦ ТМК» в г. Челябинске, 454139, ул. Новороссийская, д. 30, г. Челябинск, РФ

^б ОП ООО «ИЦ ТМК» в г. Екатеринбурге, 620014, ул. Сакко и Ванцетти, д. 67, г. Екатеринбург, РФ

^в ОП ПАО «ТМК» в г. Челябинске, 454129, ул. Машиностроителей, д. 21, г. Челябинск, РФ

^г Филиал ПАО «ТМК» ЧТПЗ, 454129, ул. Машиностроителей, д. 21, г. Челябинск, РФ

В соответствии с проектным сортаментом холоднодеформированных труб из сплава типа 02ХН30МДБ, востребованных для ПАО «Газпром» и ПАО «Лукойл», определенный объем продукции требуется в виде муфтовых полуфабрикатов под нарезку резьбы. Кооперационная схема с применением горячего прессования ограничена по возможности достижения определенной величины толщины стенки передельных труб и не позволяет получать толстостенные муфтовые заготовки требуемых размеров.

В качестве альтернативного технического решения предложено и успешно реализовано в условиях Филиала ПАО «ТМК» Челябинского трубопрокатного завода изготовление горячедеформированных труб на ТПА 8-16" с пилигримовым станом с последующей холодной прокаткой на станах ХПТ. При освоении технологии производства определен ряд технологических аспектов прокатки труб на пилигримовом стане, отличных от технологии изготовления большинства труб из нержавеющей сталей.

В ходе выполнения работы была реализована различная степень холодной деформации передельных горячедеформированных труб. Установлено, что при повышенной степени деформации значения ударной вязкости ниже установленной нормы, поэтому была применена термическая обработка по режиму, обеспечивающему соответствие механических свойств и твердости требованиям нормативной документации. При снижении степени деформации вышеупомянутые требования могут быть обеспечены без проведения термической обработки.

Таким образом, подтверждена возможность изготовления муфтового сортамента труб из сплава типа 02ХН30МДБ по технологической схеме «прокатка на пилигримовом стане – ХПТ», обеспечивающая выполнение требований нормативной документации к уровню механических свойств.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА Cu/TiC+TiB₂ ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Н. Б. Пугачева, Т. М. Крючкова, Д. И. Крючков

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

Композиты с медной матрицей привлекают внимание исследователей способностью сочетать высокую пластичность, тепло- и электропроводность матрицы с высокой твердостью и прочностью армирующих фаз. Научный и практический интерес представляет определение структурных условий для реализации пластической деформации таких композитов. Объектом исследования выбран композит, полученный самораспространяющимся высокотемпературным синтезом. Упрочнение медной матрицы композита реализуется частицами TiC и TiB₂, образующимися в результате синтеза, а также частицами Cu₄Ti, выделяющимися в медной матрице при охлаждении.

Горячую деформацию (одноосное сжатие) образцов в виде прямоугольного параллелепипеда со стороной основания 5 мм и длиной 8 мм проводили на испытательной машине INSTRON 8801 с печью для нагрева. Начальные давления меняли в диапазоне 100 – 150 МПа, нагревали образцы до 900 °С. Чем выше начальная нагрузка, тем при более низкой температуре начиналась пластическая деформация образца благодаря динамической рекристаллизации. При нестационарном одноосном сжатии вблизи боковой поверхности образцов формируются растягивающие напряжения, вызывающие образование трещин. В условиях одноосного сжатия не удалось получить истинную деформацию композита без поверхностных трещин выше 0,36. Оптимальными условиями для деформации композита являются температуры 765 – 800 °С и давление 150 МПа.

Работа выполнена по госбюджетной теме № 124020700063-3 на оборудовании ЦКП «Пластометрия».

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОЛИКАРБОНАТА И ПММА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ С ПРОВЕРКОЙ РЕЗУЛЬТАТОВ СИНХРОТРОННОЙ РЕНТГЕНОГРАФИЕЙ

А. Е. Бузюркин

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, Российская Федерация

В работе представлено численное моделирование динамического нагружения образцов из поликарбоната и полиметилметакрилата ударными волнами с верификацией результатов по данным экспериментов с использованием синхротронного излучения. Расчёты выполнены в программном комплексе «Reactor3D». Для сопоставления с экспериментом реализован алгоритм восстановления количества вещества на луче синхротронного излучения. Экспериментальные данные получены методом скоростной рентгенографии на накопителях ВЭПП-3. Сопоставление расчётных и экспериментальных диаграмм показало качественное соответствие волновых картин: наклоны фронтов ударной волны и контактной границы в обоих случаях согласуются в пределах доверительной погрешности менее 5%.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2025-479) с использованием оборудования центра коллективного пользования "Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения" Института ядерной физики СО РАН и центра коллективного пользования "Механика" Института теоретической и прикладной механики СО РАН.

ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА СЕТЧАТЫХ ПРЕГРАД, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ

А. Н. Петрова^{а, *}, И. Г. Бродова^а, А. И. Кленов^б, Е. Б. Смирнов^б,
А. Ю. Гармашев^б, А. В. Долматов^в

^а Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук, 620108, ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

^б Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической
физики имени академика Е.И. Забабахина, 456770, ул. Васильева, 13, а/я 245, г. Снежинск,
Челябинская область, Российская Федерация

^в Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии имени академика
Н.А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук, 620016, ул. Амундсена, д. 101,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

* petrova@imp.uran.ru

В данной работе для защиты конструкций от воздействия динамических нагрузок предлагается использовать 3D сетчатые преграды из алюминиевого сплава АК6, полученные методом селективного лазерного сплавления. Механические свойства таких материалов определяются плотностью, структурой ячеек и свойствами базового сплава. Были синтезированы образцы преград разных топологий построения с простой кубической решеткой, ГЦК, ОЦК структурой и структурой типа гироид, имеющие в зависимости от геометрических параметров построения (величина ячейки, толщина стенки) разную плотность от 0.9 до 2.5 кг/см³. Определено влияние геометрии построения и плотности экранов-преград 3D сплав АК6 на предел текучести при статическом осевом сжатии и на демпфирующие свойства преград в зависимости от их толщины.

Механические свойства исследованы в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ЖЕЛЕЗОАЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АЛЮМОТЕРМИИ

В. А. Худякова

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005, ул. Металлургов, 1, г. Комсомольск-на-Амуре,
Российская Федерация

Интерметаллидные железоалюминиевые сплавы привлекают внимание промышленности с преимущественной специализацией в области судостроения, авиации, машиностроения, металлургии и электротехники. Интерес к данным сплавам обусловлен их способностью противостоять коррозионному разрушению и сопротивляться износу, в том числе условиях повышенных температур и сложного нагружения. Несмотря на очевидные преимущества интерметаллидных железоалюминиевых сплавов, их промышленное внедрение сдерживается рядом недостатков, таких как склонность к хрупкому разрушению при нормальных температурах и пористость структуры. Применяются такие сплавы в основном в качестве функциональных поверхностей. Традиционные методы получения интерметаллидных железоалюминиевых сплавов отличаются многостадийностью и высокими энергетическими затратами. В качестве альтернативы, позволяющей минимизировать количество технологических операций и расширить их применение, может рассматриваться метод алюмотермии, который реализуется посредством экзотермической реакции в смесях, состоящих из железной окалины и алюминиевой стружки.

В работе представлены результаты экспериментального получения интерметаллидных железоалюминиевых сплавов из термитных шихт массой 1 кг с содержанием алюминия 25-60 мас.%, экзотермический процесс в которых активируется при различных температурных условиях: без предварительного нагрева; с предварительным нагревом до 400⁰С; с предварительным нагревом шихты до 400⁰С и огнеупорной формы до 630⁰С. Установлено, что предварительный нагрев термитных шихт с содержанием активного алюминия 50% позволяет достичь гарантированного массового выхода металлопродукта до 60%; для образцов, полученных из не нагреваемых термитных шихт, характерна микротвердость 930HV, для остальных условий 943HV и 955 HV соответственно.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАДИЙНОСТИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТОДАМИ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ**

М. В. Банников, С. В. Уваров, А. С. Никитюк, А. М. Соколов, А. В. Аристова

Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, 614013, ул. Академика Королева, 1, Пермь
Российская Федерация

Прогнозирование разрушения полимерных композиционных материалов (ПКМ) – комплексная задача, так как прочность определяется коллективным поведением ансамбля повреждений. Цель работы – установление стадийности перехода от накопления микроповреждений к макроразрушению при статическом и циклическом нагружениях через анализ интегральных структурных характеристик.

Применён комплексный подход: цифровая корреляция изображений (DIC), акустическая эмиссия (АЭ) и микротомография зон концентрации напряжений. Эксперименты проведены в условиях блочного циклического нагружения. Анализ полей деформации (DIC) позволил идентифицировать критические стадии разрушения. Для сегментации и кластерного анализа дефектов использованы байесовские модели гауссовских смесей, показавшие формирование статистически различных кластеров мелких и крупных пор.

Подтверждено, что сигналы АЭ регистрируются уже в упругой области, фиксируя обратимые изменения. Параметры сигналов коррелируют с источниками повреждений. Разные механизмы разрушения (разрыв волокон, трещины в матрице, расслоение) имеют характерные амплитудно-частотные характеристики, что позволяет идентифицировать тип дефекта в реальном времени.

Предлагаемая методика неразрушающего контроля на основе количественного анализа акустических свойств адаптирована для серийных испытаний изделий из ПКМ с минимальным числом каналов регистрации, сокращая время контроля при высокой достоверности оценки состояния материала. Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-29-01424.

ПРЯМОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. А. Голышев, А. Г. Маликов, И. Е. Витошкин, И. С. Герцель

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

Инструментальные стали широко применяются для изготовления деталей горнорудного и дробильного оборудования, работающего в условиях интенсивного абразивного и ударно-циклического нагружения. Для увеличения срока эксплуатации таких изделий необходимо формировать износостойкие покрытия на рабочих поверхностях зубьев дробилок. Однако нанесение защитных слоёв на детали сложной геометрии с высокими требованиями к адгезии и минимальной дефектности является сложной технической задачей. Одним из перспективных решений является применение технологии прямого лазерного выращивания, позволяющее восстанавливать детали или создавать защитные покрытия.

В данной работе методом прямого лазерного выращивания формировались защитные покрытия из порошковой смеси инструментальной стали. Проведена оптимизация режимов наплавки (мощность лазера, скорость сканирования, расход порошка) по критерию отсутствия пор и трещин. Для контроля эволюции фазового состава применялась диагностика с использованием синхротронного излучения. Получено, что покрытия обладают высокой износостойкостью, а твердость составила $HRC\ 66.4 \pm 0,7$. Испытания наплавленных промышленных зубьев показали снижение скорости износа зуба в 4 раза.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Механика" (ИТПМ СО РАН) и ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-459).

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗМЕРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ В ЗОНАХ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛОПАСТЕЙ КОЛЕС ГЭС

Е. В. Анискович

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
660049, пр-т Мира, 53, г. Красноярск, Российская Федерация

Наиболее нагруженными элементами гидроагрегатов являются рабочие колеса (РК). Основные механизмы возникновения дефектов - эрозия, коррозия, кавитация, трещинообразование и усталость металла в зонах неоднородности механических свойств. По результатам обследования лопастей РК были выявлены множественные кавитационные повреждения (дефекты) на напорной стороне лопастей РК. Статистический анализ результатов контроля позволил определить их основные геометрические размеры: длину, ширину и глубину, а по построенным гистограммам распределения – определить наиболее вероятные размеры и статистические законы распределения. Дефекты были оценены в трех зонах: первая и вторая – на двух лопастях в верхней части РК, третья – у кромки лопасти в нижней части РК. Получены следующие наиболее вероятные размеры дефектов: в 1-ой зоне: длина в диапазоне 0,2-100 мм, ширина в пределах от 0,5-150 мм, глубина – 2,0-8,0 мм; во 2-ой: длина в диапазоне 0-500 мм, ширина 0-600 мм, глубина – 0,2-10,0 мм; в 3-ей: длина в диапазоне 0,2-15 мм, ширина 0,5-25 мм, глубина – 0,1-8,5 мм. Определены следующие статистические законы распределения выборок: для 1-ой зоны: длина и ширина – экспоненциальный, глубина – логнормальный; для 2-ой: длина – нормальный, ширина – Вейбулла, глубина – логнормальный; для 3-ей: длина, ширина и глубина – логнормальный закон. Полученные значения наиболее вероятных размеров дефектов и типы их законов распределения будут использоваться в дальнейшем для оценок уровней надежности и безопасности РК.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СКАФФОЛДОВ ДЛЯ ЗАМЕЩЕНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Ю. В. Пирогова, В. М. Затонская, Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Восстановление костных дефектов, вызванных травмами и заболеваниями опорно-двигательного аппарата, представляет одну из ключевых задач современной регенеративной медицины. Благодаря сочетанию высоких удельной площади поверхности и несущей способности, структуры на основе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП) являются перспективными кандидатами в качестве пористых скаффолдов для замещения костной ткани. Однако в каждом случае необходимо подобрать параметры пористой структуры так, чтобы, обеспечить соответствие механического отклика скаффолда поведению естественной костной ткани и выполнение предъявляемых к нему механических и биологических требований. Целью данной работы является оптимизация механического отклика скаффолда с учетом отклика костной ткани путем управления параметрами архитектуры ТПМП.

Для решения задачи оптимизации был использован генетический алгоритм. Проведено сравнение распределений напряжений, возникающих в модели костной ткани и полученных в рамках решения задачи прототипов. Поскольку соответствие механического отклика не гарантирует выполнения требований, предъявляемых со стороны биологических характеристик, был проведен анализ морфометрических характеристик. В результате решения задачи оптимизации получены прототипы скаффолдов на основе ТПМП с минимальной степенью различия между их механическим откликом и откликом костной ткани 5%, тогда как без оптимизации различие составляло 16–18%.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2024-0013).

ЭВОЛЮЦИЯ ВЕКТОРИАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТАНТ УПРУГОСТИ NI-НАНОКОМПОЗИТОВ

С. А. Берестова, К. В. Серков

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», 620062,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

В работе исследованы траектории текстурных состояний никелевых нанокomпозитов. Рассмотрена модель поликристаллического англомерата с внутренней кубической симметрией структуры и учетом преимущественной ориентировки кристаллографических осей в объеме материала. Рассчитаны усредненные по объему эффективные технические константы упругости. Проведен анализ динамики упругих свойств никелевых нанокomпозитов при плавном изменении ориентационных параметров кристаллографической текстуры. Построены векториальные поверхности модуля Юнга и модуля сдвига, разработана модель анимационного представления изменений в упругих свойствах никелевых нанокomпозитов. Исследования проиллюстрированы на основе экспериментальных данных из независимых источников. Установленная взаимосвязь между эволюцией текстуры и анизотропией упругих характеристик, что открывает возможности для целенаправленного управления свойствами материалов в аэрокосмической отрасли, энергетике и микроэлектронике.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДЖОНСОНА-КУКА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК6, ПОЛУЧЕННОГО АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ

А. И. Кленов^а, И. Г. Бродова^б, А. Н. Петрова^б, Н. Н. Тулаева^а, Е. Б. Смирнов^а,
А. Ю. Гармашев^а

^а Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

^б Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Цель исследований – определение динамических свойств объёмно-структурированных образцов с разной топологией – кубической (ГЦК, ОЦК) и ТППМЭ (типа гироид), синтезированных из сплава АК6 на 3D принтере, и описание их деформационного поведения с помощью модели Джонсона – Кука. Сплошные и сетчатые образцы были нагружены методом Гопкинсона-Кольского в интервале скоростей деформации 10^2 – 10^3 с⁻¹. Проведено сравнение механических свойств образцов с разной сетчатой структурой. Показано, что условный предел текучести образцов с кубической топологией ниже на 10-15%. По результатам экспериментальных исследований поведения материала при динамическом нагружении определены параметры модели Джонсона-Кука. С учетом определенных параметров модели Джонсона-Кука создана расчётная модель деформационного поведения цилиндрического сплошного образца в случае его метания в абсолютно жёсткую преграду. С применением пакета конечно-элементного анализа проведено численное моделирование деформирования образца диаметром 20 мм длиной 40 мм. Получена эпюра вертикальных смещений образца в случае различных скоростей метания от 20 до 100 м/с.

Структурные исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА МЕТОДОМ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОПКИНСОНА

Е. А. Черногузова, А. И. Клёнов, Д. Т. Юсупов, Е. Б. Смирнов,

И. Г. Галиуллин, К. М. Просвирнин, А. В. Сарафанников, М. В. Малых

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Применение широкого круга материалов, в том числе взрывчатых веществ (ВВ), в различных отраслях новой техники предусматривает их нагружение динамическими воздействиями различной природы (удар, взрыв, электромагнитные, тепловые, и прочие механические импульсные поля и т.д.). Для точного и рационального проектирования или изучения особенностей анализа поведения динамически нагруженных конструкций, содержащих в своём составе ВВ, и изделий из ВВ, с целью их точного и рационального проектирования подразумевает необходимо знание механических свойств материалов при таких скоростях деформации, которые они испытывают в процессе эксплуатации. Особое место в подобных исследованиях занимает исследование влияния деформации и истории ее изменения на физико-механические свойства материалов при скоростях деформации $10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Для определения режимов динамического нагружения взрывчатых веществ в ряде случаев, на начальном этапе исследований удобно и безопасно использовать инертные имитаторы. Одним из таких имитаторов является органическое стекло полиметилметакрилат (ПММА).

В данной работе с целью будущих исследований ВВ методом ССГ проведено изучение напряженно-деформированных состояний ПММА на цилиндрических образцах.

Задача работы – получение диаграмм напряженно-деформированных состояний ПММА.

В ходе исследований проведено 15 экспериментов с образцами из оргстекла. Диапазон скоростей ударника от 11 до 20 м/с, при этом скорости деформации образцов составили от $0,4 \times 10^3$ до $1,6 \times 10^3$ 1/с. Полученные экспериментальные данные дают информацию для построения моделей деформирования ПММА и позволяют относительно безопасно приступить к исследованию деформации ВВ.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОЛНОВОГО РЕДУКТОРА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

И. К. Фарукшин, О. О. Сиверин, Е. Е. Алексеев, В. Д. Саломонов,
В. Д. Афтенко

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», 454080, пр. Ленина, 76, г. Челябинск,
Российская Федерация

Предиктивное техническое обслуживание приводов промышленных роботов позволяет снизить незапланированные простои оборудования. Традиционные методы мониторинга виброанализ, акустическая диагностика и тепловой контроль, не обеспечивают качественного обнаружения дефектов в реальном времени. В работе описаны стендовые испытания волнового редуктора с промежуточными телами качения, изготовленного с использованием FDM-печати и разработанная интеллектуальная система виброакустического мониторинга DIAGNOX. Стендовая установка включает сервопривод, систему управления Arduino, датчики вибрации (модуль Troyka, пьезоэлемент SW-420) и акустические датчики (модуль Troyka, микрофонный модуль) с частотой опроса около 200 Гц. Система DIAGNOX реализована на Python с интерфейсом Tkinter и работает в реальном времени: два канала – АКУСТИКА и ВИБРАЦИЯ – отображают графики амплитуд, статусные метки («Норма» / «Аномалия»), ведут счётчик аномалий и обеспечивают экспорт журнала в CSV. Классификация состояния выполняется многослойным персептроном (MLP), обученным на фреймах по 256 отсчётов с нормализацией сигнала в диапазоне [-1; 1]. Модульная архитектура позволяет заменять модели scikit-learn без изменения остального кода. В ходе испытаний подтверждена способность системы обнаруживать имитированные дефекты в реальном времени, что свидетельствует о перспективности подхода для предиктивного обслуживания роботизированных приводов.

УЧЕТ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ЧАСТИЦ В РАМКАХ МНОГОУРОВНЕВОЙ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВОВ

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Комсомольский проспект,
29, г. Пермь, Российская Федерация

Современное проектирование технологий изготовления изделий требует высокой точности из-за необходимости их надёжной эксплуатации в широком диапазоне условий, включая экстремальные. Важное влияние оказывает внутренняя структура материала. Для сплавов особую роль играют интерметаллидные частицы – их взаимодействие с носителями основных механизмов деформирования в зависимости от температуры, скорости нагружения и микроструктуры определяет различные варианты поведения материала.

Предлагается модификация ранее разработанной статистической многоуровневой модели алюминиевых сплавов добавлением учёта интерметаллидных частиц различного типа и их влияния на внутризеренное и зернограничное скольжение. Ключевые соотношения модели – эволюционные уравнения для критических сдвиговых напряжений (законы упрочнения), в которых учитываются размер, объёмная доля и распределение, модуль сдвига частиц. Модель протестирована на описании деформирования бикристалла алюминия при повышенных температурах, применена для описания деформирования алюминиевых сплавов при повышенных температурах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002.

ЦИФРОВОЕ МНОГОУРОВНЕВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРУТКА ИЗ СТАЛИ 40

К. А. Романов, Н. С. Кондратьев, А. И. Швейкин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, пр. Комсомольский, 29,
г. Пермь, Российская Федерация

Проектирование функциональных материалов-изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами, которые определяются состоянием внутренней структуры, является одной из ключевых задач современной промышленности. В работе используется методика функционального проектирования для поиска оптимальной зеренной структуры прутка из стали 40 при его эксплуатации. Процессом изготовления прутка являлась последовательность операций экструзии и волочения, а процессом эксплуатации – изгиб прутка. Рассматривалось два возможных механизма потери прочности прутка при эксплуатации – развитие усталостных трещин в его объеме и достижение предела текучести на поверхности. При этом оба указанных механизма зависят от размера зерна – для повышения усталостной трещиностойкости необходимо его увеличение, а для повышения предела текучести – уменьшение. Следовательно, оптимальной для эксплуатации является структура с градиентным распределением размера зерна по радиусу прутка. Для решения задачи поиска требуемой структуры использовалась двухуровневая статистическая конститутивная модель с явным учетом внутренней структуры и описанием критериев прочности. Для повышения вычислительной эффективности применялся комбинированный подход к моделированию.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРОТУРБИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРИИ

С. В. Маслов

^a ФГБУН Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии Наук (ИМАШ РАН), 101990,
Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва, РФ
maslovsv@inbox.ru

Цель работы – разработка метода контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) внутренних поверхностей оборудования, подверженных воздействию давления и тепловых потоков. Объекты контроля – корпуса паровых турбин, стопорных и регулирующих клапанов, паропроводы. Действующие факторы: давление теплоносителя и тепловые потоки со скоростью изменения температуры до 5°С/с. Для анализа прочности необходимо учитывать изменения всех 3-х компонент тензора напряжений. При известных главных направлениях измерениями определяются 2 компоненты деформаций, что недостаточно для оценки по критерию Мизеса-Хенки. Измеряя изменения внутреннего давления, можно построить полные тензоры напряжений и деформаций в расчётной точке. Для этого предложен следующий алгоритм.

Из соотношений между измеренными (*) деформациями ε^* и главными напряжениями σ : $E\varepsilon_i^* = \sigma_i - \mu(\sigma_j + \sigma_k)$, где i, j, k – индексы главных осей и учитывая, что $\sigma_k = -P$, после преобразований получаем формулы для искомых величин:

$$\varepsilon_k = -\frac{P}{E} \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}\right) - \frac{\mu}{1-\mu} (\varepsilon_i^* + \varepsilon_j^*); \quad \sigma_{i,j} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_i^* + \mu\varepsilon_j^*) - \frac{\mu}{1-\mu} P$$

Характеристики E , μ и P задаются как функции температуры и времени.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код научной темы, присвоенной учредителем: FFGU-2024-0020.

ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA

А. А. Каменских, Ю. И. Лесникова, А. Н. Труфанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Сенсорные системы и датчики на основе оптических волокон позиционируют положение объекта в пространстве или отслеживают изменение физических величин. Оптическое волокно состоит из стеклянной основы, легированной различными оксидами, покрытой защитной оболочкой из одного/двух слоев полимеров. Такая защитная оболочка ограждает волокно от воздействия влаги и пыли, химических и механических повреждений. При работе сенсорных систем в широком диапазоне температур в некоторых случаях фиксируется температурный дрейф, который может быть связан с термомеханикой полимерных материалов. Для анализа влияния покрытия на оптические и деформационные параметры рассматриваемых волокон требуется построение моделей, учитывающих температурные эффекты.

Была выполнена серия экспериментов, направленная на описание термомеханики материалов DeSolite 3471-1-152A и DS-2015, которые используются в качестве защитных покрытий оптического волокна типа Panda. Проанализировано влияние температуры на поведение материалов в рамках динамического механического анализа, в том числе при изменении амплитуды и частоты осциллирующей нагрузки. Для построения модели термовязкоупругого поведения образцов также определены зависимости коэффициента термического расширения материалов от температуры. Модели материалов построены на основе уравнений максвелловского типа. Верификация выполнена в рамках контрольной серии экспериментов на ползучесть. Проведена оценка работы системы волоконно-покрытие при разных условиях нагружения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0007).

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗНОГО ХАРАКТЕРА И УРОВНЯ ТЕРМОСИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФРИКЦИОННОЕ КОНТАКТНОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОПОРНОЙ ЧАСТИ

А. П. Богданова, А. А. Каменских, Ю. О. Носов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Перепады температур оказывают сильное влияние на деформирование несущих элементов мостового пролета в целом и неметаллических элементов в частности. Рост автомобильного потока и высокоскоростного движения поездов формирует разный характер изменения нагрузки во времени, что также сказывается на работе моста. Комплекс опорных частей обеспечивает подвижность мостового сооружения и компенсирует силовые и температурные воздействия. Поэтому требуется анализ реакции опорных частей на уровень и характер приложения нагрузки.

Тефлоновые слои скольжения широко используются для обеспечения функциональной работы опорных частей мостов. Сильное деформирование, деградация и разрушение тефлона (фторопласт, ПТФЭ) отмечается при анализе работы опорных частей. Это приводит к необходимости провести оценку возможности замены ПТФЭ на современные антифрикционные материалы (модифицированные полимеры и композиты).

В рамках работы выполнена серия экспериментов по определению термомеханических свойств 2 композитов на основе ПТФЭ и 3 модификаций ПТФЭ (с учетом и без учета разного типа наполнителей), а также чистого ПТФЭ и СВМПЭ как материалов применяемых в качестве слоев скольжения опорных частей. Построены модели термовязкоупругости материалов. Исследовано деформирование слоев скольжения в конструкции сферической опорной части при разном уровне и характере приложения термосиловых воздействий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00638, <https://rscf.ru/project/25-29-00638/>.

**К ВЫБОРУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ (Cu-Fe, Ni-Ti) ИЗ
ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ ОТ РАЗМЕРА ЗЕРЕН ПРИ
ДИСПЕРСИОННОМ УПРОЧНЕНИИ-РАЗУПРОЧНЕНИИ**

А. А. Решетняк^{а, б}, В. В. Шамшутдинова^а

^а Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, пр. Ленина, 30, Томск,
Российская Федерация

^б Томский государственный педагогический университет, 634061, ул. Киевская, 62, Томск,
Российская Федерация

В рамках статистического подхода в наших работах в 2016-2023 предложено теоретическое обоснование и описана физика закона Холла-Петча (ХП) $\sigma_y(d) = \sigma_0 + kd^{-1/2}$ и аналитической связи напряжения течения $\sigma = \sigma(\varepsilon, d)$ при ИПД для поликристаллических (ПК) материалов с равновесной дефектной структурой (РДС). А именно, представлены 2 базисные функции распределения дефектов в зависимости от размеров зерен d для основного дислокационного ансамбля с вектором Бюргерса b , модулем сдвига G , температурой T в одномодальном ПК материале:

$$\frac{d\bar{n}}{\bar{n}} = f_N^{MB}(b, x^{-2}, T)dx = 4\pi \left(\frac{Mb}{\pi}\right)^{3/2} x^2 e^{-Mbx^2} dx, \quad x = d^{-1/2}, \quad M = \frac{Gb^3}{2kT}; \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{n}}{\bar{n}} = f_N^{BE}(b, x^{-2}, T)dx = \left(\frac{3\sqrt{\pi}}{8} \zeta\left(\frac{5}{2}\right) (Mb)^{-5/2}\right)^{-1} x^4 (e^{Mbx^2} - 1)^{-1} dx. \quad (2)$$

Здесь \bar{n} концентрация дефектов, k – постоянная Больцмана, M – энергетический масштаб, $\zeta\left(\frac{5}{2}\right) = 1,34149$ – значение функции Римана $\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} n^{-s}$.

Распределение дефектов по типу Максвелла-Больцмана (МВ) (1) и по типу Бозе-Эйнштейну (ВЕ) (2) приводят к соответствующим напряжениям течения:

$$\sigma_{MB} \sim \sqrt{\varepsilon \frac{b}{d}} g(M) e^{-\frac{M(\varepsilon)b}{2d}}, \quad \sigma^{BE} \sim \sqrt{\varepsilon} \frac{b}{d} f(M) \cdot \left(e^{\frac{Mb}{d}} - 1\right)^{-\frac{1}{2}}$$

при деформации ε с вполне определенными функциями $g(M)$ и $f(M)$.

Для дисперсионно упрочненного ПК агрегата (Cu с частицами α -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 ВЕ.

$$\sigma_{\Sigma dis}(d, d_{dis}, d_p, \varepsilon) = (1 - U_{dis}) \left\{ f_1 \sigma^{BE}(d) - f_2 \sigma^{BE}(d) \Big|_{d=d_p} \right\} + U_{dis} \sigma_{dis} \Big|_{d=d_{dis}} \quad (3)$$

(аналогично для распределения МВ) с весами $f_1 = (1 + (d_p/d))^{-3}$, $f_2 = 1 - f_1$ - 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 экспериментально наблюдаемый процесс упрочнения-разупрочнения. Актуален вопрос: какая из функций распределения дефектов точнее описывает закон Холла-Петча (3)? Требуется экспериментальная проверка альтернатив:

гипотеза 1 (справедливость распределения дефектов по Бозе-Эйнштейну (2))

При дисперсионном упрочнении меди железом частицами $d_{Fe} = (300 \div 350)$ нм точка перехода “упрочнение-разупрочнение” (УР) наблюдается только для распределения ВЕ в диапазоне $d_{Cu} = (40 \div 50)$ нм при $\sigma_{\Sigma dis} = (1,10 \div 1,15)$ ГПа. Разупрочнения Cu для распределения МВ не наблюдается;

гипотеза 2 (справедливость МВ распределения (1))

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.

И для ПК агрегата Ni- α -Ti:

гипотеза 1 (справедливость распределения дефектов по Бозе-Эйнштейну (2))

При дисперсионном упрочнении Ni частицами α -Ti с $d_{Ti} = (150 \div 200)$ нм точка перехода УР наблюдается только для распределения ВЕ в диапазоне $d_{Ni} = (60 \div 80)$ нм при $\sigma_{\Sigma dis} = (0,9 \div 1,0)$ ГПа. Разупрочнения Ni для распределения МВ не наблюдается;

гипотеза 2 (справедливость МВ распределения)

Точка УР для распределения (1) появляется при размере $d_{Ti} = (190 \div 210)$ нм и $\sigma = (0,8 \div 0,9)$ ГПа в диапазоне $d_{Ni} = (50 \div 75)$ нм.

ИЗНОС СЛОИСТОГО СТАЛЬНОГО КОМПОЗИТА, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ДАВЛЕНИЕМ

М. М. Сибиряков*, А. М. Иванов, Н. Ф. Стручков

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

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

* sibiryak.m88@mail.ru

Трение сопряженных поверхностей вызывает износ, который вызывает деформацию и удаление материала с изменением размеров деталей машин.

Рассматривается износ слоистого стального композита, полученного сваркой давлением (кузнечной сваркой) низколегированной стали 09Г2С и коррозионно-стойкой легированной стали 40Х. Композит получен из заготовок из низколегированной стали 09Г2С и легированной углеродистой стали 40Х соотношении 55:45. Соединение «09Г2С + 40Х» получали нагревом пакета из 8-ми пластин (с чередованием 09Г2С и 40Х) в кузнечном горне, с дальнейшей ковкой с помощью пневматического молота модели МВ4127 с температурой началаковки 1523 К и окончания 1123 К. При этом температуру начала и концаковки контролировали с помощью инфракрасного термометра модели ДТ-8859.

Массовый износ и параметры шероховатости по измерениям профиля поверхности трения указывают на повышенные значения износостойкости композита «09Г2С + 40Х» по сравнению со сталью 09Г2С за счет более высокой микротвердости составляющей 40Х при сравнительных испытаниях колодок на износ, проведенных на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск – колодка» в режиме сухого трения.

Исследование проведено в рамках проекта FWRS-2024-0035 Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Программы фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ С СВЕТОПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИТАМИ ПРИ РЕСТАВРАЦИИ КЛИНОВИДНОГО ДЕФЕКТА

А. А. Каменских, С. С. Седельникова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Клиновидный дефект широко распространенное некариозное поражение зубов – пришеечная эрозия эмали и дентина. Статистика отмечает существенный рост распространенности заболевания в России и мире. При этом наблюдается малый временной период эксплуатации реставраций дефекта, связанный с деградацией и разрушением материалов, а также потерей адгезии с живыми тканями зубов. Данные о влиянии геометрии и глубины клиновидного дефекта на контакт реставрации с живыми тканями зуба ограничены, в том числе с точки зрения анализа влияния материала. Поиск новых методов диагностики, лечения и профилактики клиновидных дефектов остается актуальным вопросом современной стоматологии и биомеханики. Интерес представляет численное моделирование поведения зуба до и после реставрации клиновидного дефекта.

В рамках исследования создана конечно-элементная трехмерная модель зуба с параметризированным клиновидным дефектом. Рассмотрено поведение зуба с учетом и без учета стандартной реставрации. Два светополимерных композита разных производителей (Herculite XRV (Kerr Corporation, США); Charisma (Charisma Global Industrial Company, Германия)) и керамика CEREC (Dentsply Sirona Inc., США) были рассмотрены, как материалы реставрации. Исследовано влияние разного уровня и характера приложения нагрузки от зуба антагониста и разной геометрической конфигурацией клиновидного дефекта. В первом приближении рассматривается полная адгезия между живыми тканями зуба (дентин, эмаль) и материалами реставрации.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ НЕСПЕЧЕННЫХ ПРЕССОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

П. А. Поляков

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

Детали общемашиностроительного назначения занимают преобладающее место в порошковой металлургии. Важным технологическим аспектом при получении порошковых заготовок является выбор режима прессования, обеспечивающий возможность их последующей термомеханической обработки в неспеченном состоянии. Указанная возможность определяется прочностью межчастичных связей, поскольку межчастичное разрушение является одной из основных причин брака при производстве порошковых изделий. Поэтому необходимо обеспечить минимальную достаточную прочность межчастичных связей, что также позволяет минимизировать энергозатраты при прессовании. Следует учитывать, что максимальная пористость материалов конструкционного назначения не должна превышать 20-25%. В частности, при производстве мало- и умереннонагруженных машиностроительных деталей, для которых такой уровень пористости является достаточным, основной операцией является холодное прессование, не обеспечивающее высокий уровень прочности межчастичных связей неспеченных заготовок. Известно, что для порошковых материалов свойства заготовок будут зависеть от гранулометрического и химического состава исходных порошков. Связь свойств прессовок с плотностью в общем случае невозможно определить теоретически. При расчетах реальных процессов зависимости термомеханических параметров от плотности следует определять экспериментально. Однако в ряде практически важных случаев, например, при наличии одного легирующего элемента (бимодальные структуры), возможно на основе данных для материала основы прогнозировать прочность межчастичных связей порошковых композиций без проведения комплекса их прочностных испытаний. Современные подходы к определению прочности межчастичных связей, как правило, базируются на условии прочности Кулона-Мора.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ И ТЕРМОМЕХАНИКА ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ ПОСЛЕ ОТВЕРЖДЕНИЯ

А. А. Каменских, В. И. Струкова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Фотополимерные смолы применяются для выращивания моделей отливок для литья по выжигаемым моделям. Ранее распространенные американские и европейские фотополимеры на настоящий момент труднодоступны на территории Российской Федерации. При этом производство аддитивных материалов активно развивается в России и мире. В рамках текущего состояния рынка, для исследования выбран набор фотополимерных смол отечественного и зарубежного производства, который включает специализированные материалы для выжигания и твердотельные смолы. Твердотельные фотополимеры были выбраны благодаря тому, что фотополимерная смола SI500 (EnvisionTec Inc., США), первоначально не позиционируемая как выжигаемая, в России зарекомендовала себя при использовании в технологическом процессе литья по выжигаемым моделям.

Список современных фотополимерных материалов включает разработки отечественных компаний ООО «НПП «3D Аддитивные технологии»» и ООО «HARZ Labs», а также разные бренды/линейки материалов иностранных производителей Yongchanghe Technology Co.Ltd. (г. Шэньчжэнь, Китай), Shenzhen Anycubic Technology Co. Ltd (г. Шэньчжэнь, Китай) и т.д.

Для первоначальной оценки работы материалов выбран и проведен ряд экспериментальных исследований: термогравиметрический анализ при температурах до 700 °С и динамический механический анализ при температурах до 225 °С.

Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Пермского края, соглашение от 26 февраля 2025 г. № С-26/940.1.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

О. А. Староверов, В. Э. Вильдеман

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Комсомольский проспект,
29, г. Пермь, Российская Федерация

Проведено исследование влияния поперечных, относительно схемы армирования, низкоскоростных ударных воздействий в широком диапазоне потенциальной энергии на закономерности закритического деформирования и разрушения слоистых полимерных стеклопластиков со схемой армирования $[0/90]_n$. Экспериментальная часть включала в себя испытания на предварительный локальный удар падающим грузом, реализованный по схеме трехточечного изгиба, с последующим квазистатическим одноосным деформированием до разрушения. Построены диаграммы деформирования исследуемых стеклотекстолитов ВФТ-С с использованием видеосистемы регистрации полей перемещений VIC-3D. Рассмотрены вопросы тензометрирования образцов, находящихся в условиях неоднородного НДС, обусловленного наличием концентраторов напряжений эксплуатационного характера. В условиях одинаковой скорости деформирования при растяжении получены данные, отражающие влияние интенсивности ударных воздействий на реализацию ниспадающей ветви диаграммы деформирования. Проведена оценка влияния параметров предварительного удара на остаточные прочностные и деформационные резервы исследуемого стеклопластика. Представлены результаты изучения смены механизмов разрушения при различных энергиях предварительного ударного воздействия.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00765-П) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СЛОИСТЫХ, ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРЕГРАД

А. Е. Краус

ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, Российская Федерация

В работе представлен комбинированный численно-аналитический подход к оценке динамического предела текучести гетерогенных и слоистых преград при высокоскоростном нагружении. Численное моделирование реализовано с использованием модели Джонсона – Кука и модифицированного критерия Тулера – Бучера при помощи программного комплекса «Reactor3D». Для верификации результатов представлен метод энергетического баланса, где кинетическая энергия налетающего тела сопоставляется с работой пластической деформации, затраченной на формирование кратера. Эффективность методики подтверждена сопоставлением с экспериментом для стали Ст3, титанового сплава ВТ1-0, алюминия Д16Т и гетерогенного материала (TiB₂+NiTi)/ВТ1-0.

Расхождение между расчетными и экспериментальными параметрами (геометрия кратеров, зоны разрушения) не превышает 10%, а для оценки динамического предела текучести стали Ст3 и сплава ВТ1-0 погрешность составила менее 3%. Показано, что Ст3 демонстрирует высокую способность к пластической диссипации энергии, в то время как ВТ1-0 характеризуется локализацией деформаций и более ранним разрушением.

Предложен и обоснован энергетический подход к оценке динамической прочности слоистых структур, основанный на принципе аддитивности работы пластических деформаций. Выведенное аналитическое соотношение позволяет определять эффективный динамический предел текучести конфигурации по геометрическим параметрам области разрушения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01202, <https://rscf.ru/project/25-29-01202/>.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЛЬНИКОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

П. О. Буковский^а, Д. В. Демченко^б

^а Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва,
Российская Федерация

^б Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119234, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 11,
г. Москва, Российская Федерация

В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния финишной термообработки (700, 900 и 1100°C) на трибологические характеристики фольгированных уплотнений из терморасширенного графита, используемых в сальниках запорной арматуры. Испытания проводились на трибометре УМТ-ЗМТ по схеме полного контакта, которая имитирует реальные условия эксплуатации уплотнений. Нормальная нагрузка составляла 500 Н, скорость скольжения 3 и 5 мм/с. Эволюцию микрорельефа анализировали методом конфокальной профилометрии на профилометре Neox. Было обнаружено, что в диапазоне скоростей 3-5 мм/с коэффициент трения остается стабильным. Изменения находились в пределах погрешности измерений, что свидетельствует о формировании стабильного режима трения за счет эффективного переноса графитовой трибопленки на контртело. В то же время финишная термообработка оказала существенное влияние на износостойкость: образец при температуре 700°C показал минимальную скорость износа ($3,9 \times 10^{-6}$ мм³/Нм при 3 мм/с и $2,94 \times 10^{-6}$ мм³/Нм при 5 мм/с), что почти в два раза ниже, чем у других исследуемых образцов. Это связано с аморфной структурой и развитой удельной поверхностью, обеспечивающими пластическую адаптацию и ускоренное образование трибопленки. Термообработка при 1100°C формирует упорядоченную кристаллическую структуру, снижающую трение, но повышающую склонность к хрупкому разрушению.

Исследование выполнено за счет гранта РФФ № 25-11-00350.

ДИАГНОСТИКА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ, РИСК-АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. А. Махутов^а, В. В. Москвичев^б, Н. А. Чернякова^б

^а Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, пер. Малый Харитоньевский, 4,
г. Москва, Российская Федерация

^б Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 660049, пр-т Мира,
53, г. Красноярск, Российская Федерация

В рамках общей блок-схемы расчетно- экспериментальных методов решения прикладных задач конструкционной прочности, ресурса и безопасности технических систем (ТС) проведена систематизация типов предельных состояний (основных, дополнительных и аварийных), расчетных моделей анализа предельных состояний в штатных и риска в аварийных ситуациях (АС). Анализ основных типов предельных состояний базируется на традиционных критериях прочности и долговечности, дополнительных – на критериях механики разрушения. Разработанная методология получила развитие в приложениях для элементов космических аппаратов спутниковых систем, сварных конструкций, подъемно-транспортной и экскавационной техники, сосудов давления и резервуаров, гидроэнергетического оборудования ГЭС.

Комбинированное использование традиционных критериев конструкционной прочности и критериев механики разрушения создает основу критериальной базы при анализе безопасности сложных ТС в рамках концепции ненулевого риска аварий. Безопасность становится основным приоритетом создания ТС учитывая, что избыточная прочность и резервирование не исключают аварийных ситуаций.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СЕЙСМОСТОЙКИХ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ

А. А. Каменских, Ю. И. Лесникова, А. Р. Мухаметшин, Ю. О. Носов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Урбанизация территорий развивается ускоренными темпами. Обеспечение связности субъектов страны и повышение транспортной мобильности создают необходимость строительства мостовых сооружений на территориях со сложными или суровыми температурными и геологическими условиями. Это, в свою очередь, ставит задачи проектирования сейсмостойких конструкций опорных частей мостов, в том числе с учётом термомеханических свойств материалов. Мировые производители применяют сферические балансиры для гашения сейсмических колебаний мостовых сооружений. Однако на территории Российской Федерации производство сейсмостойких опорных частей пока не налажено.

На первом этапе рассмотрено влияние периодической нагрузки на поведение контактного узла классической конструкции сферической опорной части с учётом термомеханического поведения неметаллических материалов слоя скольжения. Проведен анализ влияния геометрической конфигурации слоя скольжения на контактное напряжённо-деформированное состояние конструкции.

На втором этапе исследования предложены две конструкции сейсмостойких опорных частей с различной геометрической конфигурацией сопряжения сферического балансира с плоским слоем скольжения. Выполнен анализ влияния колебаний на поведение объекта исследования с учётом вертикальной и горизонтальной составляющей нагрузки, а также фрикционного контакта элементов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00470, <https://rscf.ru/project/25-29-00470/>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГРАММ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УРОВНЕ НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦА ИЗ СТАЛИ 17Г1С

Р. С. Ахметханов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, 101990, М.Харитоньевский пер. 4,
Москва, Россия

В докладе представлены результаты исследования термограмм при разрушении образца из стали с концентратором напряжения тепловым методом контроля. В исследовании решалась задача определения количественных и качественных характеристик распределений температуры по образцу (сталь 17Г1С), зависящей от уровня упругих и пластических деформаций.

Процесс нагружения образца с концентратором напряжений контролировался с помощью тепловизора MicroScan 7600 PRO с фиксацией термограмм нагрева образца. Методической основой исследований термограмм были: кластеризации изображений, вычисление статистических характеристик распределений температуры в образце при нагружении.

Проведенные исследования термограмм полученных в процессе нагружения образца показывают, что при упругой деформации происходит перераспределение локальных уровней температур в начальной стадии без увеличения коэффициента вариации и среднеквадратического отклонения, которые увеличиваются значительно перед началом процесса разрушения образца; температура образца значительно возрастает перед началом разрушения в области концентратора напряжений. Т.е. концентратор проявляется при нагружении близко к пределу прочности образца.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания FFGU 2024-0020.

ТЕПЛОВАЯ ДИАГНОСТИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Р. С. Ахметханов*

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, 4, М.Харитоньевский пер., Москва,

101990, Россия

* mibsts@mail.ru

В докладе представлены результаты:

- особенности тепловой диагностики технических систем;
- исследование локальных распределений температуры при нанесении повреждений на образцы и их разрушении; цель исследования – определить общие особенности распределения локальных температур в образцах.

В докладе приводятся различные примеры экспериментов при использовании пассивного метода теплового контроля.

Первый пример – нанесение повреждения резцом в виде задира на образец из стали. В процессе задира образец также был подвержен прогибу. Термограммы этого процесса нагружения показали, как менялся характер распределения температуры на поверхности образца.

Второй пример – ударное нагружение образца из композиционного материала.

Третий пример – нагрев углеродной нити, состоящей из большого количества филаментов, при различном уровне напряжения.

Исследованиями выявлены количественные отличия коэффициента вариации и среднеквадратического отклонения для случаев образца без дефекта и наличия дефекта. Наиболее информативным критерием являются высота пика (температуры), эксцесс и коэффициент вариации.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания FFGU 2024-0020.

МЕТОД УТОЧНЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО ИХ ОБЪЕМУ

С. Т. Калашников^а, Г. Ф. Костин^б, В. А. Тюменцев^в, Р. К. Швалева^{а, б}

^а АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева», 456300, Тургоякское шоссе, 1,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

^б Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, 456317,
тер. Ильменский заповедник, корп. 1, г. Миасс, Челябинская обл., Россия

^в ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», 454001, ул. Братьев Кашириных, 129,
г. Челябинск, Челябинская обл., Россия

В качестве теплозащитных покрытий высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) в настоящее время широко применяются углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ). При обгаре на траекториях полета ЛА структура УУКМ проявляется на поверхности в виде крупномасштабной и мелкодисперсной шероховатости. Крупномасштабная шероховатость возникает из-за неодинакового линейного уноса элементов армирования и углеродной матрицы УУКМ, а мелкодисперсная реализуется как на элементах армирования, так и на углеродной матрице вследствие выхода на поверхность и последующего разгара пор, раковин, других дефектов. В работе представлен метод уточнения эквивалентной песочно-зернистой шероховатости поверхностей УУКМ при их обгаре на траектории с использованием результатов электронно-микроскопических исследований распределения пор, раковин, других дефектов по объему УУКМ. В основе метода лежит сравнение закономерностей сопротивления поверхностей с выступающими элементами шероховатости и с элементами в виде выемок и пересчет от сопротивления выемок, образуемых выходом на поверхность при обгаре УУКМ на траектории пор, раковин, других дефектов к эквивалентному сопротивлению выступающих элементов.

Ключевые слова: летательные аппараты, углеродные композиционные материалы, шероховатость поверхности, унос материалов, диагностика пор, раковин.

СОВРЕМЕННЫЕ ГИБРИДНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ МОРСКОГО БИООБРАСТАНИЯ

Т. Д. Кугрышева, В. А. Винокуров

РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 119296, г. Москва, пр-кт Ленинский, д. 65, к. 1

Морское биообрастание поверхностей является одним из ключевых факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики морских судов и конструкций. Традиционные противообрастающие покрытия содержат биоциды, подавляющие рост морских организмов. Из-за ужесточения экологических требований и ограничения использования токсичных соединений, необходима разработка экологически безопасных материалов.

Современные противообрастающие покрытия не содержат биоциды, механизм действия основан на снижении адгезии микроорганизмов к поверхности. Силиконовые и фторсодержащие полимерные материалы обладают низкой поверхностной энергией и высокой гидрофобностью. Они становятся барьером для прикрепления микроорганизмов, образующих биоплёнку. Перспективным направлением является разработка экологичных гибридных полимерных покрытий с улучшенными механическими свойствами. Одним из таких материалов является полиглицидилметакрилат, содержащий эпоксидные группы, химическая модификация которых (аминирование) позволяет изменять поверхностные свойства материала. Полученные данные продемонстрировали статически значимое снижение адгезии микроводорослей *Phaeodactylum tricornutum*, обеспечив ингибирование биообрастания на уровне 94,8% по сравнению с контрольными образцами, не содержащими аминогрупп.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ АРМОЦЕМЕНТНЫХ ЭКРАНОВ ПРИ УДАРЕ

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

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

В работе представлены результаты трёхмерного численного моделирования взаимодействия цилиндрического титанового ударника с барьерами из тяжёлого армоцемента с различными схемами армирования. Расчёты выполнены методом конечных элементов с использованием конечно-элементной модели, содержащей порядка 22 млн элементов. Для описания поведения бетона применялась модель Джонсона–Холмквиста, учитывающая накопление повреждений и развитие трещин при динамическом нагружении.

Рассматривались скорости удара 100 и 250 м/с. Проведён анализ влияния типа армирования (стержни и стальные пластины) на глубину проникания, остаточную скорость ударника и степень разрушения бетона. Показано, что конфигурация армирования существенно влияет как на сопротивление пробитию, так и на характер разрушения.

Выявлена зависимость между сопротивлением пробитию и степенью повреждения конструкции: пластинчатое армирование обеспечивает наибольшее снижение скорости ударника, однако приводит к более интенсивному разрушению бетона, тогда как стержневое армирование ограничивает распространение повреждений при более высокой остаточной скорости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-21-00588).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА 3D-СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ НА АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А. Ф. Ильющенко, А. И. Лецко, Т. А. Николайчук

Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа,
ул. Платонова, 41, г. Минск, Республика Беларусь

Известно, что современное аддитивное производство (АП), включающее в себя в том числе и 3D-печать порошковых материалов и изделий методом селективного лазерного сплавления (СЛС) частиц порошков металлических сплавов, неуклонно расширяет номенклатуру выпускаемой продукции из-за востребованности её применения в различных отраслях народного хозяйства. Его особенностью является то, что выпуск такой продукции становится рентабельным только при условии использования на единичном или мелкосерийном производстве. При таком выпуске контроль её качества является актуальной задачей, для решения которой разработана уникальная методика 3D-сканирования порошковых материалов и изделий, получаемых методом СЛС. В основу этой методики заложен некоторый критерий качества, позволяющий определять сорт выпускаемой продукции или проводить её отбраковку. На этот критерий качества влияют пределы различимости 3D-печати методом СЛС, а также характерные этой технологии появляющиеся на поверхностях получаемых материалов макро- и микродефекты. Базовым инструментом контроля формы и габаритных размеров выпускаемой продукции в разработанном методе является 3D-сканер, примером которого является используемый ATOS Triple Scan, а для уточнения полученных на нём результатов о микродефектах – атомно-силовой микроскоп NT 206.

Предложенная к рассмотрению методика контроля качества активно используется на АП Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа (Республика Беларусь) и разработана в рамках выполненных НИР по грантам НАН Беларуси (№2024-26-124 от 01.04.2024 г. и №2025-26-030 от 10.04.2025 г.)

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ФОСФОГИПСА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

М. В. Прожега^а, Н. Н. Смирнов^а, П. Н. Волченкова^{а, б}

^а Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук, г. Москва, Россия

^б Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

Будучи твердым минералом, в тонкодисперсном состоянии фосфогипс гипотетически может выполнять функцию твердой смазочной добавки. Кроме того, фосфогипс термически стабилен до 100-150°C, что выгодно отличает его от органических присадок, склонных к деструкции при нагреве.

Цель работы – изучить трибологические характеристики смазки с добавлением фосфогипса и оценить целесообразность применения этого материала в качестве присадки.

Исследовали 2 типа смазочного материала – базовый (литиевый) и с добавлением 10% фосфогипса. Для каждого из них проводили серию из 3 опытов, критерий остановки – либо по времени (10 суток), либо по резкому возрастанию коэффициента трения.

Получены зависимости коэффициента трения от времени $f(t)$.

Установлено, что добавление фосфогипса:

1. Повышает коэффициент трения от 0,0014 для базовой смазки до 0,0017 (взяты усредненные по 3 опытам значения);
2. Снижает ресурс подшипников почти в 2 раза (ресурс рассчитан как отношение количества полных оборотов к количеству смазки в мг).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2026-0003.

ЗАДАЧА МАРШРУТИЗАЦИИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМ РЕСУРСОМ; ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ ДЕКОМПОЗИЦИИ

А. Г. Ченцов^{а, б}, П. А. Ченцов^{а, б}

^а ИММ УрО РАН, 620108, ул. С.Ковалевской, 16, г. Екатеринбург, Российская Федерация

^б Уральский федеральный университет, 620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Исследуется задача, ориентированная на логистические проблемы в малой и беспилотной авиации в связи с обеспечением транспортного сообщения на труднодоступных территориях; работа продолжает предыдущее исследование. Исследуется модель на основе обобщенной задачи коммивояжера с условиями предшествования при дополнительном ограничении, имеющим смысл неравенства, оценивающего дальность беспосадочного перелета. Естественная минимаксная постановка может приводить к решениям с неудовлетворительным качеством совокупного процесса (минимизируя стоимость наиболее затратного этапа, мы допускаем ухудшение показателей типа суммарного времени посещения всех пунктов посадки). В этой связи мы рассматриваем в качестве основной аддитивную задачу маршрутизации с дополнительной системой неравенств, получая задачу на условный экстремум. Следуя подходу авторов, для решения данной задачи с аддитивным критерием применяем метод, использующий динамическое программирование и систему штрафов за нарушение упомянутых ограничений в виде неравенств. Данный метод комбинируется с приемом, базирующимся на идее декомпозиции совокупной задачи при наличии конечной системы упорядоченных кластеров заданий, что позволило решать задачи большой размерности за приемлемое время оптимально в классе композиционных решений. Построенный алгоритм реализован на многоядерной ПЭВМ; проведен обширный вычислительный эксперимент.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ СТЕКЛОЭПОКСИДНОГО МАТЕРИАЛА

М. В. Прожега^а, Н. Н. Смирнов^а, И. А. Лешаков^а, П. Н. Волченкова^{а, б}

^а Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук, г. Москва, Россия

^б Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

Стеклоэпоксидные композиты – перспективные материалы для использования в узлах трения лопаток гидротурбин ввиду их низкого водопоглощения, механической прочности и жесткости. С ними создают безмасляные узлы трения, что исключает возможность загрязнения воды выбросами смазочного масла.

Цель работы – оценить влияние антифрикционных добавок на трибологические свойства подшипников скольжения из стеклоэпоксидного материала.

Изучали 3 типа образцов с различными антифрикционными добавками – политетрафторэтиленом и графитом. Основа образцов: эпоксидно-диановая смола, стеклоткань, полиэтиленполиамин и дибутилфталат. Испытания проводились по схеме «вал-втулка» при возвратно-вращательном движении контробразца по неподвижному образцу. Материалы испытывали при сухом трении с нагрузкой 2,5кН и в воде с нагрузками 5 и 10кН.

Получены зависимости коэффициента трения от времени $f(t)$.

Выводы:

1. Добавка ПТФЭ в виде муки благоприятно сказывается на коэффициенте трения при работе на воздухе.
2. При работе в жидкости при повышенных нагрузках наименьший коэффициент трения демонстрирует образец, содержащий ПТФЭ и графит.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2026-0003.

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОГО МЕТАЛЛА ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

П. В. Лаврентьева, С. А. Баранникова

Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН, 634055, пр. Академический, 2/4,
г. Томск, Российская Федерация

Целью настоящей работы является экспериментальное установление связи между стадийностью кривой пластического течения, изменением скорости распространения ультразвуковых волн и накоплением повреждаемости на примере технического алюминия (содержание Al – не менее 99,5 мас.%) с размером зерна ~ 40 мкм. Плоские образцы растягивались на испытательной машине «Instron-1185» с постоянной скоростью. Одновременно с регистрацией кривых нагружения производилась запись изменения скорости ультразвуковых волн автоциркуляционным методом. Относительное изменение плотности (дефект плотности $\Delta\rho/\rho_0$) деформированных образцов по сравнению с их исходным состоянием определяли методом гидростатического взвешивания. Установлено, что зависимости параметра поврежденности от напряжений течения для разных температур имеют стадийный характер, коррелирующий со стадиями деформационного упрочнения. Понижение температуры приводит к увеличению прочности и параметра поврежденности Al. Показана возможность оценки поврежденности образцов Al акустическим методом в условиях статического нагружения в широком температурном интервале от 173 К до 350 К. Экспериментально установленные закономерности изменений параметра поврежденности могут быть использованы в задачах технической диагностики состояния промышленных металлов и сплавов, подвергнутых пластическим деформациям.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема № FWRW-2026-0006.

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛИЗОВАННОГО РАЗРУШЕНИЯ В КВАЗИХРУПКОМ МАТЕРИАЛЕ С МНОГОУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

И. Е. Шиповский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,
111020, Крюковский тупик, д. 4, Москва, Российская Федерация

Структурно-неоднородные квазихрупкие материалы природного и техногенного происхождения целесообразно рассматривать как системы с многоуровневой иерархической организацией, в которых микродефекты, межзеренные и межблочные интерфейсы, а также крупные неоднородности совместно определяют сценарий разрушения при динамическом нагружении. Предлагается модель повреждаемого материала с явным кинетическим описанием стадийного перехода от докритического накопления дефектов к активированному локализованному разрушению. В модели разделены медленная эволюция скалярной поврежденности и быстрая активация очага локализации, скорость которой задается драйвером поврежденно-напряженного состояния, учитывающим текущую прочность и уровень структурной нарушенности. Такая постановка связывает отклик материала на микро-, мезо- и макроуровнях и позволяет описывать не только условие предельного состояния, но и темп его достижения при импульсном воздействии. Подход ориентирован на моделирование материалов с многоуровневой иерархической структурой и может использоваться для прогноза локализации деформаций, потери несущей способности и перехода к макроразрушению в технологических конструкциях и природно-технических системах.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ
ПЛАСТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ
ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КАК РЕЗУЛЬТАТА ПРОЦЕССОВ
В ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЕ МАТЕРИАЛА**

М. А. Соковиков^а, М. Ю. Симонов^б, В. В. Чудинов^а, В. А. Оборин^а,
С. В. Уваров^а, О. Б. Наймарк^а

^а Институт механики сплошных сред УрО РАН, 1, ул. Академика Королева, г. Пермь, 614013,
Российская Федерация

^б Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 29, Комсомольский пр-кт, Пермь,
614990, Российская Федерация

Проводились испытания образцов при различных видах динамического нагружения. Поведение материалов изучалось на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского с применением высокоскоростной камеры Photron FASTCAM SA-Z 2100K и DIC технологии. Величины температурных полей, которые в процессе деформирования исследовались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M, не подтверждают представления о механизме локализации деформации, связанном с термопластической неустойчивостью. Микроструктурный анализ, проведенный с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа, показал коррелированное поведение ансамбля дефектов, которое может быть классифицировано, как структурный переход, обеспечивающий локализацию деформации. Данные экспериментальных исследований и численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов при реализованных условиях нагружения обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов. Исследования осуществлялись в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН (тема № 124020200116-1).

СВЯЗЬ ВНУТРЕННЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ МЕТАМАТЕРИАЛА С ЕГО ДЕФОРМАЦИОННЫМ ОТКЛИКОМ

Л. Р. Ахметшин*, Ч. Исмаилова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, пр. Академический, 2/4, 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. Отдельный класс метаматериалов – механические метаматериалы. В данной работе с использованием программного комплекса Ansys WB методом конечных элементов были проведены расчеты одноосного сжатия кубических образцов из метаматериала, построенного из элементарных ячеек с тетрахиральной структурой граней. В данной работе рассматривается метод соединения ячеек «внахлест», который отличается от метода «присоединение». Были рассмотрены образцы с разной конфигурацией внутренних стенок, под которой понимается направление вращения хиральных структур в них. Направление вращения может изменяться посредством топологических преобразований. Для описания поведения базового материала (каркаса) использовалась система уравнений теории упругости с учетом больших перемещений. При одноосном нагружении вдоль оси Y образец деформируется с вращением тетрахиральных структур. Особое внимание уделялось отклонению вершин верхней грани в плоскости XZ .

В исходной структуре стенки вдоль осей X , Y и Z имели следующие направления хиральности влево, влево, влево, вправо, вправо, если смотреть из бесконечности в начало координат (рис. 1а). Для сравнения рассмотрим зеркальное отображение направления вращения. В новой конфигурации – с топологическими преобразованиями, направления соответствовали обратному порядку: вправо, вправо, вправо, влево, влево (рис. 1б).

Тетрахиральная структура интересна с точки зрения проявления эффекта «нагружение–скручивание». В образцах из метаматериала, в процессе

одноосного нагружения, усилие от верхней грани передается на перпендикулярные стенки, в которых хиральные структуры начинают вращаться. Совокупное вращение хиральных структур в стенках приводит к скручиванию образца. В исходном и зеркальном образцах их скручивание направлено против часовой стрелки, если смотреть на образец навстречу направлению оси Y, и приводит к отклонению вершин верхней грани, указанному на рис. 1.

исходная		отклонение		зеркальная
	5,34 мм	ΔX_{max}	мм	
	- 6,96 мм	ΔX_{min}	мм	
	7,16 мм	ΔZ_{max}	мм	
	- 5,27 мм	ΔZ_{min}	мм	

Рис. 1. Изображение схемы вращения стенок метаматериала в исходном и зеркальном образце, а также значения отклонения в процессе одноосного нагружения

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01182, <https://rscf.ru/project/25-29-01182/>.

ЭФФЕКТИВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА В ОБРАЗЦЕ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА С НЕПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

К. Иохим, Ч. Исмаилова

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

Российская Федерация

* iokhim.k@mail.ru

Метаматериалы представляют собой искусственно созданные материалы и состоят из периодически или непериодически расположенных элементарных ячеек. При тщательном и разумном проектировании они могут проявлять особые и практичные свойства и функции, такие как появление дополнительной степени свободы или отрицательный коэффициент Пуассона (ауксетики). Тетрахиральные структуры проявляют ауксетические свойства, за счет эффекта «нагружение–скручивание». Из типичных хиральных решеточных структур для настоящей работы выбрана тетрахиральная структура.

Для описания поведения базового материала (каркаса) использовалась система уравнений теории упругости с учетом больших перемещений. Для решения системы уравнений применяли метод конечных элементов. В образцах из метаматериала, в процессе одноосного нагружения, усилие от верхней грани передается на перпендикулярные стенки, в которых хиральные структуры начинают вращаться. Совокупное вращение хиральных структур в стенках приводит к скручиванию образца. В работе рассмотрены различные конфигурации метаматериала за счет топологических преобразований в их структуре. Образец из метаматериала состоял из 15 стенок (по 5 стенок вдоль каждой оси координат), которые в свою очередь состоят из 16 тетрахиральных структур. Под топологическим преобразованием понималось изменение направления хиральности в одной или нескольких стенок. Общее число преобразований равно 32767, в данной работе рассмотрены 63 из них.

Ранее для кубического образца метаматериала были предложены формулы для расчета усредненных значений компонент тензора деформации и поворота

через перемещения вершин образца. Подставляя значения отклонений в формулы, можно оценить механизм деформирования для рассмотренного образца. Отсюда, зная продольную и поперечную деформации можно определить значение эффективного коэффициента Пуассона. Наибольшее эффективное значение коэффициента Пуассона было равным 0,55, а наименьшее – 0,94. Последнее значение значительно превышает характерный уровень значений коэффициента Пуассона в остальных конфигурациях и указывает на аномально высокую поперечную деформацию в направлении X, несоразмерную продольной деформации. Подобное поведение невозможно объяснить классическим механизмом сжатия и, с высокой вероятностью, связано с локальной потерей устойчивости и скручивающим механизмом. Положительное значение указывает на усиление классического поперечного сжатия, вероятно связанное с перераспределением напряжений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01182, <https://rscf.ru/project/25-29-01182/>.

РОЛЬ ОКСИДА ВИСМУТА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЛЕГИРОВАНИИ СТАЛИ В ДОСТИЖЕНИИ СВЕРХНИЗКОГО ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

А. В. Макаров^{а, б}, Е. В. Харанжевский^в, А. С. Широбокова^в, А. Г. Ипатов^г,
Е. Г. Волкова^а, Ф. З. Гильмутдинов^д

^а Институт физики металлов УрО РАН, 620108, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, Россия

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

^в Удмуртский государственный университет, 426034, ул. Университетская, 1, г. Ижевск, Россия

^г Удмуртский государственный аграрный университет, 426069, ул. Студенческая, 9, г. Ижевск, Россия

^д Удмуртский федеральный научно-исследовательский центр УрО РАН, 426067, ул. Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск, Россия

Обоснована определяющая роль оксида висмута Bi_2O_3 в достижении обнаруженного авторами эффекта сверхнизкого трения и износа («безызносного трения») в результате короткоимпульсного (40 нс) лазерного легирования стальной поверхности висмутом. Эффект во многом достигается подавлением молекулярной составляющей трения (адгезии) при легировании висмутом и образованием трибослоев субкарбоната висмута с легким базисным скольжением. Триботехнические характеристики сопряжения «сталь-алюминиевый сплав» значительно улучшаются при добавлении в оплавленную лазером порошковую смесь из оксидов Bi_2O_3 и MnO_2 в качестве окислителя нитрата лития LiNO_3 , который при лазерном нагреве распадается с выделением кислорода и увеличивает долю окисленного висмута в легированной поверхности. Предложена модель «эстафетного» механизма, объясняющая достижение сверхнизкого коэффициента трения (0,02) без подачи смазки в зону трения, но с однократным нанесением тонкого слоя масла И-20 перед началом испытаний. Ключевым условием является присутствие в легированном слое висмута не в металлической, а в окисленной форме. «Эстафетный» механизм последовательно включает начальную стадию хемосорбционной активации жирных кислот на оксиде висмута (якорное крепление к поверхности), стадию образования и закрепления слоя субкарбоната висмута со слоистой структурой в результате трибохимической реакции взаимодействия оксида висмута с углекислым газом воздуха и стадию стационарного сверхнизкого трения на пути трения до 200 км с регенерацией трибослоя за счет наночастиц оксида висмута из легированного слоя.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ОСАДКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Zn-Mg-Cu

Э. И. Бурибаев^{а, б}, В. П. Швейкин^{а, в}, Д. И. Крючков^в

^а Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

^б АО «Каменск-Уральский металлургический завод», г. Каменск-Уральский,
Российская Федерация

^в Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

При пластической деформации происходит повышение температуры заготовки за счет перехода механической работы в тепловую энергию. В условиях, когда при деформации температура штампа поддерживается на уровне температуры заготовки, генерируемое тепло может существенно влиять на внутренние процессы в материале, и тем самым на конечные свойства изделия. Цель работы: обосновать температурный режим горячей изотермической осадки и определить его влияние на микроструктуру алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg-Cu.

Исследовали образцы из алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg-Cu, полученного в условиях АО «КУМЗ» в исходном состоянии – полунепрерывное литье и гомогенизационный отжиг, и после изотермической осадки при температуре ~400 °С. Химический состав сплава соответствует ГОСТ 4784-19.

Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) показала, что исследуемый алюминиевый сплав в исходном состоянии характеризуется экзотермическим эффектом в температурном интервале 370-430 °С и эвтектическим превращением по границам зерен, начиная с 475 °С.

Проведено моделирование осадки цилиндрической заготовки со скоростью движения штампа 10 мм/с в условиях, когда температура штампа поддерживается на уровне температуры заготовки в 370, 400 и 430 °С. Распределение температурных полей показывает, что есть области, в которых происходит увеличение температуры на 35-45 °С от начальной температуры заготовки. При начальной температуре заготовки и штампа 430 °С возможны области в заготовке, где будут протекать локальные эвтектические превращения вдоль границ зерен, т.е. привести к «пережогу». Поэтому наилучшей температурой для горячей изотермической обработки (ковка, штамповка) с невысокой скоростью деформации обеспечивающей максимальную степень деформации исследуемого сплава системы Al-Zn-Mg-Cu является температура 400 °С.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА 09Г2С–10Х18Н10 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

В. Е. Веселова^а, С. Д. Иванова^б, И. С. Каманцев^а, Е. А. Путилова^а

^а Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

^б ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620062, ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Реализация метода асимметричной прокатки листовых композиционных материалов (КМ) из сталей разного класса способствует снижению дефектности и улучшению механических свойств за счет воздействия на структуру, текстуру и фазовый состав. В данной работе выявлены закономерности формирования структуры и механических свойств слоистых КМ из сталей 09Г2С и 10Х18Н10 после деформационной обработки, включающей в себя асимметричную прокатку, с коэффициентом асимметрии цикла 1,2-1,28 и истинной степенью деформации 0,5-0,9.

Распределение значений микротвердости и размера зерна в поперечном сечении равномерно по всем слоям, что говорит об отсутствии значительного упрочнения межслойных границ, характерного для симметричной прокатки. Механические испытания показали рост условного предела текучести ($\sigma_{0,2}=950$ МПа) и временного сопротивления отрыву ($\sigma_B=1030$ МПа) с увеличением степени деформации, при незначительном снижении пластичности.

Фрактографический анализ выявил расслоение между сталями. Разрушение слоя 09Г2С характеризуется ямочным микрорельефом с микропустотами и участками вязкого разрушения, наблюдаются гребни и бесструктурные области. Поверхность разрушения слоя 10Х18Н10 имеет ямочный микрорельеф, с увеличением деформации уменьшается размер ямок, а число ступенек, образованных сколами вдоль двойников, увеличивается.

ЕДИНЫЙ МЕХАНИЗМ ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛО-, И МНОГО-ЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

А. П. Владимиров

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

В ИМАШ УрО РАН на основе нового механо-оптического эффекта разработан метод динамической спекл-интерферометрии, позволяющий в режиме реального времени регистрировать многоцикловую усталость материалов. Метод обеспечивает количественное определение необратимых деформаций на минимальной базе порядка 1 мкм. На машине резонансного типа с частотой около 100 Гц на многоцикловую усталость были испытаны образцы из стали 09Г2С, алюминиевого сплава Д16, композита полимер-металл и авиационного оргстекла. С использованием указанного метода был выявлен единый механизм их усталостной деградации. Показано, что на всех образцах с самого начала опытов начинается локализация необратимых процессов на малых участках. На участках образуются области, постоянно находящиеся в растянутом состоянии. Вследствие этого в областях необратимые относительные деформации вначале резко возрастают до значений порядка 10^{-3} - 10^{-2} , затем имеет место медленный их рост по механизму циклической ползучести до значений порядка 10^{-2} - 10^{-1} . После исчерпания механизмов ползучести деформации вновь резко возрастают, приближаясь к 100%. На данной стадии растягивающие деформации увеличиваются путем изменения объема: начинается генерации пор и микротрещин. При этом в сопряженной области плоскости изображения начинается «кипение» спеклов. Одновременно сопротивление материала деформированию (максимально выдерживаемое напряжение) с максимального значения спадает до нуля, в этот момент на участке размером порядка 10 мкм путем объединения дефектов образуется макротрещина.

При малоцикловой усталости из-за больших приложенных напряжений на многих участках материал сразу переходит на стадию деформационного разупрочнения. Окончательное разрушение происходит путем объединения макротрещин.

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ

М. А. Шолохов

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 620049, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

Развитие технологии дуговой сварки, связанное с формированием свойств сварных соединений посредством управления тепловложением, ведется по следующим направлениям: многоэлектродные и многодуговые процессы сварки; импульсные технологии сварки; траекторные функции перемещения сварочной дуги; разработка сварочных материалов.

Новым направлением является разработка сварочных материалов для сварки дуплексных (двухфазных – аустенитно-ферритных) сталей, где для получения сварного соединения, прочного и стойкого к коррозии, необходимо обеспечение заданной скорости охлаждения в узком диапазоне. Это достигается путем регулирования тепловложения.

Определены количественные значения величины теплового потока в сварочную ванну от источников нагрева разного вида при любых конфигурациях разделки кромок свариваемых деталей.

Разработаны методы управления формой и величиной тепловложения в сварочную ванну и свариваемые детали для управления скоростями нагрева и охлаждения и временем пребывания в интервале полиморфных превращений металла сварного шва и ЗТВ.

Формирование термического цикла сварки (СТЦ) с заданными параметрами позволяет обеспечить необходимые структуры и свойства металла шва и ЗТВ, в том числе для трудносвариваемых сталей. Построение заданного СТЦ обеспечивает получение швов с требуемой геометрией формы проплавления и формирования металла шва, а увеличение производительности обеспечивается за счёт рационального управления величиной теплового потока в сварочную ванну от источников нагрева.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ РЕЛЬСОВ МЕТОДАМИ ТЕНЗОМЕТРИИ

А. А. Игумнов^а, Т. В. Игумнова^а, А. А. Попков^а, М. М. Савиновский

^а Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, 630049,

ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, Российская Федерация

В работе проведено сравнение результатов натурального эксперимента испытания рельса тензометрическим методом и данных математического моделирования. Создана и рассчитана конечно-элементная модель измерительного сечения рельса длиной 1 м в модуле АРМ FEM КОМПАС-3D. Для рельса проанализировано деформированное состояние под поездной нагрузкой в 10 т. Оценивается применимость модели к задаче оценки деформаций рельса. Проведена верификация модели по стандартным условиям и по прогибу в натуральных условиях. Конечно-элементная модель впервые позволила провести анализ влияния базы тензодатчиков на точность определения сил в системе колеса и рельсов.

Для рельса тензодатчики устанавливались в девяти точках. Регистрация данных с тензоканалов проводилась тензометрической системой утвержденного типа Динамика-3. Определение напряжений в рельсах в эксперименте проводилось по регистрируемым и сглаженным деформациям шейки, подошвы и головки рельса в соответствии с законом Гука. Стандартным методом по известным деформациям шейки восстановлена сила воздействия на рельс и сопоставлена с реальной нагрузкой гидравлического пресса.

Проведено сравнение данных относительных деформаций участков рельса в натурном и модельном эксперименте, а также проведена оценка влияния базы тензодатчиков на результаты расчета.

Конечной целью работы является оптимальная установка тензодатчиков и датчиков деформаций, перемещений, скоростей, ускорений на рельс для измерения вертикальных и боковых сил от подвижного состава.

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА НЕИСПРАВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА: ИНТЕГРАЦИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Т. Г. Кормин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620062, ул. Мира, 19,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

В работе рассматривается метод предсказания неисправности промышленно работа основанного на физической модели работа и машинном обучении. Условия интенсивной эксплуатации промышленного работа формируют необходимость выявления дефектов на ранних стадиях зарождения неисправности, оценки остаточного ресурса робототехнических комплексов. Предлагаемый метод позволяет использовать данные вибрационного мониторинга, токовых и кинематических сигналов с физическим моделированием нагрузок и люфтов.

Физическая модель делает анализ неисправностей промышленного работа интерпретируемым и прозрачным для человека, а модель машинного обучения работает в формате выявления скрытых закономерностей в многомерных диагностических данных и увеличивает чувствительность к ранним признакам неисправности. Разработанный подход решает задачу прогнозирования ресурса механизмов промышленных роботов с позиций механики.

Метод совместим с контроллерами промышленных роботов при учете установки дополнительных датчиков, что делает его перспективным элементом для предиктивного анализа

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТВЕРДИТЕЛЕЙ НА МЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

С. В. Смирнов^а, И. А. Веретенникова^а, А. В. Пестов^б, В. А. Осипова^б

^а Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

^б Институт органического синтеза имени И.Я. Постовского УрО РАН, 620137,
ул. Софьи Ковалевской, д. 22 / 20, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Работа была направлена на изучение влияния термоциклирования на механические свойства покрытий из эпоксидной смолы ЭД-20 с использованием отвердителей полиэтиленполиамин и полиамидополиамин. Механические свойства определяли методом индентирования с применением трёхгранной пирамиды Берковича. Температурное циклическое воздействие осуществляли в соответствии с ГОСТ-27037. Исследовали три группы образцов: исходные покрытия; покрытия, подвергнутые 20 циклам температурного воздействия; покрытия, прошедшие 50 циклов температурного воздействия. В качестве характеризующих параметров рассматривали твёрдость, приведённый модуль упругости и показатель ползучести при заданном времени выдержки. Результаты исследования показали, что покрытия на основе смолы ЭД-20 с разными отвердителями демонстрируют существенные различия в механических свойствах – как в исходном состоянии, так и после термоциклирования. Для всех материалов наблюдается плавное образование и расширение областей отслаивания покрытий от подложки с увеличением количества термоциклов.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ЭД-20

А. А. Трофимов^а, С. В. Смирнов^а, А. П. Сафронов^б, К. О. Ильинова^б

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

^б Уральский федеральный университет, 620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

В данной работе был проведен динамический термомеханический анализ эпоксидной смолы (ЭС) ЭД-20, сшитой триэтилентетрамином (соотношение смолы к отвердителю 6:1), и дисперсно-упрочненных композитов, полученных добавлением в ЭС наночастиц Fe, FeO_x и Al₂O₃.

Основной характеристикой стеклообразных полимеров является температура стеклования (T_c), по величине которой может быть проведена оценка химической структуры и механических свойств материала. Результаты показали, что T_c увеличивается для всех ЭС при повторном цикле нагрева и увеличении скорости нагрева. При этом наличие и природа наночастиц несущественно влияет на T_c .

При повторном цикле нагрева на зависимости тангенса угла механических потерь от температуры наблюдается единственный пик, соответствующий переходу материала из стеклообразного в высокоэластическое состояние. В то же время при первом цикле присутствовал еще один пик при меньшей температуре, что указывает на неполное отверждение образцов до нагрева. Вид кривых динамических модулей накопления и потерь в зависимости от температуры при первом и повторном цикле нагрева подтверждает данные заключения.

Кривые «напряжение-деформация» получены при сжатии цилиндрических образцов. По результатам испытаний определены значения предела прочности, степени деформации до разрушения и модуля Юнга.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg-Si и Al-Cu-Mg

Н. А. Калинина

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

Известно, что деформация в начальной стадии прессования является крайне неравномерной. Это приводит к значительным различиям механических свойств по сечению заготовок больших размеров. В производственных условиях часть заготовки, полученной на начальной стадии прессования (так называемый выходной конец), удаляют в отходы. Доля выходных концов прессованных заготовок значительна и достигает до 1/5 длины пресс-изделия.

В мировой практике и науке накоплен разнообразный опыт в области рециклинга металлических материалов. Однако, несмотря на имеющийся опыт, все известные способы переработки основаны на переплаве отходов металлургического производства.

Введение в технологический процесс стадии промежуточной термической обработки может значительно повысить производительность прессового участка за счет вовлечения технологических отходов в дальнейший деформационный передел, исключая операцию переплава.

Цель работы – установить влияние параметров термической обработки на структуру, фазовый состав, механические и микромеханические свойства деформированных алюминиевых сплавов для устранения наследственности структуры материала, полученной в результате предшествующей деформации.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РЕСУРСА УЗЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО И ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ОТКАЗОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РОБОТА

Т. Г. Кормин*, С. А. Берестова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; Уральский федеральный университет, ул. Мира, д.19, город Екатеринбург, 620002, Россия,

* ktg39@mail.ru

В работе рассматривается оптимальная конфигурация датчиков с обоснованием типов, точек установки, режимами работы датчиков для контроля ключевых параметров. Комплексный подход позволяет реализовать систему ранней диагностики неисправностей, основанной на мониторинге ключевых показателей и выявлении скрытых дефектов на примере промышленного робота Fanuc LR Mate 200iD. В работе обсуждаются частые причины возникновения неисправностей и предлагаются эффективные способы их предотвращения, что способствует повышению надежности и долговечности робототехнических систем.

Цель исследования заключается в выработке методики организации эффективного технического обслуживания роботов за счет внедрения системного подхода к анализу состояния промышленного робота и прогнозированию остаточного ресурса.

Методика включает современные методы статистики (ARIMA-моделирование для анализа временных рядов) и теория надежности служат основой для перехода от планово-предупредительного к предиктивному обслуживанию. Внедрение данного подхода позволяет минимизировать незапланированные простои, оптимизировать затраты на запасные части и ремонты. Для выявления ключевых показателей применяется метод преобразования Фурье, исследование спектральных характеристик и динамических закономерностей. Используемые алгоритмы обнаруживают взаимосвязи между различными показателями и позволяют предугадывать приближение возможных сбоев.

Ключевые методы при построении анализа:

1. ARIMA/SARIMA для стационарных процессов;
2. Регрессионный анализ: Построение моделей связи признаков со степенью износа;
3. Кластерный анализ: Выявление режимов работы и аномалий.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КЛИНОВИДНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В. В. Артемьев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, пр-т Комсомольский, 93,
г. Пермь, Российская Федерация
slavaav@mail.ru

Ключевые слова: технологический процесс, толстостенная конструкция клиновидной формы, полимерный композиционный материал, технологические напряжения и деформации.

В связи с расширением области применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) можно выделить отдельный класс толстостенных конструкций клиновидной формы. Характерными особенностями данного класса конструкций можно отнести наличие трех различных по толщине зон: зона с максимальной толщиной, зона с минимальной толщиной и переходной клиновидной зоны. Для данного класса конструкций выявлены дефекты в виде расслоений, обусловленные высоким уровнем технологических напряжений, возникающих на этапе изготовления.

Проанализированы основные составные части механизма возникновения технологических деформаций в классе конструкций из ПКМ клиновидной формы и разделены на три группы в зависимости от причин возникновения: свойств материала, параметров конструкции, параметров технологического процесса.

Предложены модификации конструктивного облика толстостенной конструкции в зоне технологического припуска: «секторное» армирование, локальное «секторное» армирование, внедрение вкладыша из однородного эластичного материала, разделение заготовки конструкции с помощью демпфирующей прокладки. Выполнена численная оценка эффективности предложенных методов по снижению уровня технологических напряжений.

ИНИЦИАЦИЯ ХРУПКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО АРМИРОВАННОМ МАТЕРИАЛЕ

В. Е. Шавшуков*, Е. С. Разумовский**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

29, Комсомольский проспект, Пермь, 614990, Россия

* shavshukov@pstu.ru, ** erazumovskij@yandex.ru

Пространственно-армированные композиционные материалы с взаимно ортогональным расположением волокон сравнительно редко применяются в несущих конструкциях. Причиной тому низкая жесткость и прочность при сдвиге в плоскостях ортотропии. Это особенно существенно в композитах с пироуглеродной матрицей, прочностные характеристики которой существенно ниже соответствующих величин конструкционных полимерных связующих. Однако, в некоторых ответственных конструкциях или их элементах, вследствие особенностей геометрической формы и других причин, использование ортогонального армирования становится предпочтительным. Одной из таких конструкций является ацетобулярный компонент эндопротеза тазобедренного сустава, представляющий собой половину полого шара, нагруженного по внутренней и наружной поверхностям контактными давлениями. Для изготовления этого компонента по медико-биологическим причинам применяются углерод-углеродные композиты (УУКМ), а шаровая симметрия диктует ортогональное армирование в сферической системе координат. Слабым звеном является поликристаллическая пироуглеродная матрица, с повреждения которой чаще всего начинается разрушение углеродных композитов. В представленной работе исследуется инициация повреждений в ацетобулярном компоненте из ортогонально армированного УУКМ.

Анализ на основе простых инженерных макроскопических критериев прочности показывает, что при нагрузках на конструкцию эндопротеза до 3000 Н в матрице не должно быть разрушений. Однако, на масштабном уровне отдельных зерен реализуются сильно флуктуирующие мезодеформации и мезонапряжения, амплитуда которых может намного превосходить величину

макродеформаций и макронапряжений, что инициирует повреждения сначала в отдельных наиболее нагруженных зернах. При увеличении нагрузки повреждения распространяются на другие зерна, что в конечном итоге может привести к деградации механического сопротивления матрицы. В работе выполнен анализ стохастических мезонапряжений в зернах матрицы в наиболее нагруженных зонах углерод-углеродного композита. Показано, что повреждения в зернах начинаются уже с нагрузки 2208 ньютонов. Анализ проведен с помощью метода интегральных уравнений для мезодеформаций. Построены плотности вероятностей распределения мезонапряжений, по которым вычислены вероятности различных возможных типов повреждений как функций общей нагрузки на эндопротез. Показано, что в отношении инициации повреждений рассмотренная конструкция ацетобулярного компонента обладает большей надежностью, чем традиционно применяемый в клинической практике стэм (ножка) эндопротеза из однонаправленного УУКМ.

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

ВЛИЯНИЕ ПОВОРОТА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЯЧЕЕК НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ СЖАТИИ

М. П. Варыгина

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 660049,
пр-т Мира, 53, г. Красноярск, Российская Федерация

Инновации в технологиях аддитивного производства позволяют создавать конструкции со сложной геометрией с улучшенными механическими свойствами, способных эффективно поглощать энергию удара, звуковые волны и вибрации за счет высокой пористости, обладая при этом легким весом. Такие конструкции, основанные на использовании повторяющихся элементарных ячеек трижды периодических минимальных поверхностей (triply periodic minimal surfaces, TPMS), являются более перспективными по сравнению с традиционными сотовыми и решетчатыми структурами. Они находят широкое применение в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, гражданском строительстве, биоинженерии. Кроме того, возможность проектировать структуры TPMS с различной толщиной, относительной плотностью, размером и ориентацией элементарных ячеек позволяет адаптировать механические свойства конструкций, соответствующих требованиям конкретных приложений.

В данной работе представлены результаты численного моделирования механического поведения пористой периодической структуры на основе минимальных поверхностей ИВП Шоэна и примитива Шварца с различной ориентацией элементарных ячеек под действием сжимающей нагрузки.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПРИВЕРШИННОЙ ОБЛАСТИ ТРЕЩИНЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ, СОПРОВОЖДАЮЩЕМСЯ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ

Л. В. Степанова, О. Н. Белова, Д. В. Чаплий

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086,

Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

Существующие аналитические подходы не позволяют полностью описать эволюцию полей напряжений и деформаций у вершины трещины в сложных и ответственных элементах конструкций при ползучести с учётом накопления повреждения материала. Разработка верифицированных численных моделей, воспроизводящих зарождение и рост микродефектов в этой области, открывает путь к созданию физически обоснованных критериев разрушения. В связи с этим численное моделирование процессов накопления повреждений вблизи вершины трещины в условиях ползучести остаётся актуальной задачей современной теории деформируемых твёрдых тел, особенно применительно к длительно работающим высокотемпературным установкам. Для симуляции и прогнозирования кинетики накопления повреждений в программную реализацию метода конечных элементов встроено эволюционное уравнение Качанова-Работнова с внесением скалярной меры поврежденности в определяющие соотношения установившейся ползучести, что позволило выявить диапазоны асимптотического поведения полей сплошности и напряжений: выделены интервалы, на которых справедливы различные асимптотики – асимптотическое поведение ближнего поля, промежуточную асимптотику и асимптотику дальнего поля. Численные расчеты проведены для широкого ряда металлов и сплавов. Проведенные расчеты для времен от сотен часов до десятков лет продемонстрировали свойство автомодельности решения и позволили найти автомодельную структуру решения, что открывает возможности прогностических оценок развития поврежденности в элементах конструкций.

Авторы благодарят РФН, проект № 25 - 21- 00272.

ПРОГРАММА ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ РЕАКЦИЯ-ДИФФУЗИЯ ПРИ ЗАДАННЫХ НУЛЕВЫХ ФРОНТАХ ДЛЯ ДВУХ ИСКОМЫХ ФУНКЦИЙ

Л. Ф. Спевак, О. А. Нефедова

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург,
Российская Федерация, lfs@imach.uran.ru, nefedova@imach.uran.ru

Доклад посвящен созданию программы для решения одномерных нестационарных задач для системы двух вырождающихся параболических уравнений вида

$$\begin{cases} u_t = uu_{xx} + R(u)u_x^2 + F(u, v), \\ v_t = vv_{xx} + Q(v)v_x^2 + G(u, v). \end{cases} \quad (1)$$

Подобные системы широко применяются при моделировании нестационарных процессов тепло- и массопереноса сложных сред в физике, химии, а также в математической биологии.

Рассмотрена краевая задача для системы (1) при краевых условиях, задающих уравнения нулевых фронтов для двух искомых функций

$$u(t, x)|_{x=a(t)} = 0, \quad v(t, x)|_{x=b(t)} = 0. \quad (2)$$

В основе расчетного модуля лежит подход, основанный на методе коллокаций с применением разложений по системе радиальных базисных функций. Решение строится по шагам по времени с разностной аппроксимацией по времени.

Программа разработана в IDE Eclipse на языке программирования C++ с применением технологии параллельного программирования OpenMP и является частью составного программного комплекса, который развивает разработанный авторами подход для решения краевых задач математической физики.

С целью проверки сходимости численно-аналитической методики и эффективности работы программы были проведены вычислительные эксперименты для задач, имеющих точные решения. Расчеты показали корректность работы программы и хорошее соответствие точным решениям.

ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ ГЕОМАТЕРИАЛОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ: НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

И. Ж. Бунин, А. Н. Кочанов

^a Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, 111020, Крюковский тупик, 4, Москва, Российская Федерация

Разрушение горных пород – один из наиболее энергоемких процессов горного производства, определяющий эффективность взрывных работ, дезинтеграции руд и безопасность ведения горных работ. В последние десятилетия развитие теоретических подходов требует детального анализа предразрушения как стадии эволюции внутренней структуры геоматериалов при импульсных воздействиях. Под зоной предразрушения понимается область материала, где под влиянием внешних нагрузок происходит необратимое изменение свойств и накопление повреждений в конечном временном интервале.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований механизмов дефектообразования на различных структурных уровнях в горных породах: осадочном доломите, интрузивном пегматите и граните. Эксперименты проводились в условиях экстремальных ударно-волновых и электромагнитных импульсных воздействий.

Основной научный результат получен на основе анализа данных растровой электронной микроскопии (РЭМ). Установлено, что предразрушение в экстремальных режимах характеризуется высокой плотностью наведенных микродефектов и существенной неоднородностью их распределения. Выявлено, что для карбонатных пород преобладающим механизмом является развитие межкристаллитной трещиноватости и активация дислокационной структуры. В магматических породах (гранит, пегматит) зоны предразрушения локализуются преимущественно на границах раздела минеральных фаз, где зафиксировано образование сеток микротрещин субмикронного размера.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПЕЧАТИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ АДДИТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ

И. С. Никитин, А. О. Семенюк, Р. С. Черниченко, Е. А. Воропаева,
Н. Р. Дудова, А. А. Калинин, С. Ю. Миронов

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, ул. Победы, 85, г.
Белгород, Российская Федерация

Изучено влияние режимов селективного лазерного сплавления (СЛС) на характеристики шероховатости изделий из высокохромистой стали 17-4 PH.

Обнаружено, что шероховатость изменяется по-разному на верхней и боковой поверхности в зависимости от параметров печати. На верхней поверхности значения Ra снижаются от 15 до 5 мкм, а Rz от 70 до 30 мкм при повышении объемной энергии печати от 50 до 220 Дж/мм³. Интенсивное снижение шероховатости приходится на интервал энергий от 50 до 90 Дж/мм³, после чего значения Ra и Rz стабилизируются на отметках ≈ 5 и ≈ 30 мкм соответственно. На боковой поверхности параметры шероховатости изменяются монотонно: Ra увеличивается от 12 до 20 мкм и Rz от 60 до 100 мкм при повышении объемной энергии печати от 50 до 220 Дж/мм³.

Установлено, что мощность лазера привносит больший вклад в снижение параметров шероховатости сравнительно со скоростью сканирования. Мощность лазера от ≈ 180 до ≈ 300 Вт при скоростях сканирования от ≈ 500 до ≈ 1000 мм/с обеспечивают низкие значения шероховатости. Повышение объемной плотности энергии при СЛС приводит к снижению шероховатости обрабатываемой лазером поверхности, но способствует ее повышению на боковой поверхности.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10342, <https://rscf.ru/project/25-79-10342/>», с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛИ ИЗ ЯЧЕЕК НА ОСНОВЕ «ПРИМИТИВА ШВАРЦА»

Е. В. Москвичев

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 660049, пр. Мира, 53,
г. Красноярск, Российская Федерация,
jugr@ict.nsc.ru

В работе исследовались образцы перспективных сэндвич-панелей из ячеек на основе трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS). Образцы состояли из трех слоев – ячеистого наполнителя и двух стенок. Наполнитель представлял собой повторяющуюся структуру из ячеек на основе TPMS «примитив Шварца». Размер ячейки составлял 10x10x10 мм. Количество ячеек по трем направлениям составляло 16, 4 и 2.

Методом FDM 3D-печати было изготовлено два образца из разных материалов – ABS и PLA-CF пластика. Полученные образцы испытывались на трехточечный и четырехточечный изгиб. Далее было выполнено конечно-элементное моделирование проведенных испытаний. В конечно-элементных моделях использовались «редуцированные» ячейки с меньшим количеством фасет. Модели создавались в двух вариантах – из объемных и оболочечных конечных элементов.

По результатам испытаний и моделирования были определены жесткости натуральных и модельных образцов. Разница жесткости модельных образцов по сравнению с натурными составила от 0,8 до 6%. Таким образом, созданные конечно-элементные модели с инженерной точностью описывают упругое деформирование образцов сэндвич-панели. Кроме того оболочечная модель видится перспективной для расчета элементов конструкций с ячеистой структурой, поскольку требует меньшее количество вычислительных ресурсов при достаточной точности решения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ СВЕРХТОНКОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ НА КРЕМНИЕВОМ ОСНОВАНИИ

Л. В. Степанова^а *, К. А. Буланова^а

^а Самарский национальный исследовательский университет имени акад. С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

В докладе рассматриваются принципиальные вопросы молекулярно-динамического (МД) описания статического и циклического нагружения сверхтонкой алюминиевой пластины на кремниевой подложке. Данная конструкция является неотъемлемой частью микро и наноэлектромеханических систем (МЭМС/НЭМС). Актуальность МД моделирования нагружения сверхтонкой алюминиевой плёнки на кремниевом основании обусловлена широким применением гетероструктур Al/Si в качестве мембран и резонаторов МЭМС/НЭМС. Традиционные экспериментальные методы не позволяют исследовать зарождение и эволюцию дефектов на атомном уровне, а континуальные теории оказываются несостоятельны в субмикронном диапазоне толщин. МД-моделирование даёт возможность прогнозировать усталостную прочность, адгезионные свойства и диссипацию энергии в реальных условиях эксплуатации устройств, что составляет фундаментальную основу для создания надёжных МЭМС/НЭМС нового поколения. Необходимостью и мотивом обращения к атомистическим рассмотрением явлений, происходящих при нагружении сверхтонких пластин являются 1) фундаментальный научный интерес к атомным механизмам деформации в наноразмерных гетероструктурах; 2) невозможность получить аналогичные данные экспериментальными методами с таким же уровнем детализации (пространственное разрешение – ангстремы, временное – фемтосекунды). В работе рассматриваются вопросы перехода от атомистических полей, получаемых методом молекулярной динамики, к континуальным полям напряжений. Реализованы и развиты процедуры временного и пространственного усреднения механических полей, полученных в рамках методологии молекулярной динамики.

Авторы выражают благодарность РФФИ проект 25-11-00333.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО СТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА У8+08Х18 ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ЧИСТОГО ПЛОСКОГО ИЗГИБА

А. А. Минаков¹, А. И. Плохих¹

¹ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 105005, ул. 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1, г. Москва, Российская Федерация

В машиностроении ведется разработка новых высокопрочных материалов со структурной, отличной от поликристаллических материалов. Примером могут служить многослойные стальные материалы, получаемые методом горячей пакетной прокатки, обладающие высокой прочностью и многослойной структурой. Зная, что увеличение прочности коррелирует с увеличением усталостных свойств, интерес вызывает изучение выносливости таких материалов.

В работе было исследовано поведение многослойного стального материала модельной композиции У8+08Х18 и сталей У8 и 08Х18 в условиях симметричного знакопеременного нагружения по схеме чистого плоского изгиба на усталостной машине Schenk-Erlinger (с определением напряжений тензометрическим методом). Построенные кривые Велера показали рост предела выносливости у многослойного стального материала на ~ 27 % и ~ 38 % по сравнению со сталями и влияние величины среднего напряжения на его долговечность при усталости – данный материал работал хорошо только в области умеренного нагружения. Для исследования поведения в области сильного нагружения использовался методгиба с перегибом, показавший разрушение данного материала до завершения одного цикла изгиба. Фрактографический анализ поверхностей разрушения усталостных образцов многослойного стального материала У8+08Х18 показал хрупкий характер разрушения в образце, испытанном по методугиба с перегибом, и хрупко-вязкий характер со значительным вкладом вязкой составляющей в образце, испытанном по схеме чистого плоского изгиба.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ

Н. В. Дмитриев

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, Малый Харитоньевский пер., 4, г. Москва,
Российская Федерация

Среди полимерных композитных материалов, получивших распространение в современной технике, своё применение нашли материалы, армированные тканями. Структура и свойства композитов с тканью в качестве наполнителя (тканых композитов) значительно отличаются от однонаправленных композитов, армированных прямолинейными волокнами. Как правило процесс разработки и изготовления деталей из них, основан на упругих и прочностных характеристиках материала, которые можно определить из стандартных механических испытаний. Хотя численные расчёты, основанные на методе конечных элементов, позволяют получить количественные оценки упругих свойств тканых композитов, согласующиеся с экспериментальными данными, применение расчетов не позволяет получить представление о работе материала на качественном уровне.

Сравнение существующих механических структурных моделей, применяемых для оценки упругих свойств тканых композиционных материалов показывает, что классические модели, разработанные для композитов с однонаправленным армированием, недостаточны для точного прогнозирования упругих констант материалов, армированных тканями.

Структурные модели, учитывающие изгиб волокон в тканых композитах, позволяют увеличить точность оценки их упругих характеристик. Для различных типов тканых композитов показано, что технические константы, рассчитанные на основе таких моделей, отличаются от значений, полученных численными расчетами, в пределах от 0,2 % до 4,7 %.

Финансовая поддержка. Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020.

**КИНЕТИКА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ
ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ
РАЗНООРИЕНТИРОВАННЫХ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКИХ
МАЛОЦИКЛОВЫХ ТРЕЩИН**

И. В. Макаренко, Л. В. Макаренко

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,

Москва, Россия.

e-mail: I.V.Makarenko@yandex.ru

В работе проведено исследование и моделирование, на структурно-масштабных микро-, мезо- и макроуровнях, кинетики деформационных, энергетических параметров и морфометрических характеристик поверхностей пространственных малоцикловых трещин в аустенитных сталях типа 08X18H10T для уточненного ресурса и живучести элементов авиационного, ракетно-космического, атомного и другого ответственного оборудования. Показана взаимосвязь исследуемых характеристик с параметрами нелинейной механики разрушения. На основе численных расчетов на базе программных комплексов ANSYS и MATLAB и результатов расчетно-экспериментальных исследований получена их функциональная зависимость.

Научное издание

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»
сб. материалов (Екатеринбург, 18-22 мая 2026 г.)

Рекомендовано к изданию
Ученым советом ИМАШ УрО РАН

Издается в авторской редакции
Компьютерная верстка
П. А. Скорынина
Е. В. Фатыхова

ISBN 978-5-6040873-6-7



9 785604 087367

Подписано в печать 11.05.2026 г. Формат 60×90 1/8.
10.93 усл. п. л. Объем данных 28,3 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/conf2026/about/>