

Российская Академия Наук
Межгосударственный координационный совет по физике прочности и пластичности
материалов
Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербургский научный центр
Объединенный научный совет по проблемам материаловедения, механики, прочности
ООО «Альфа Технологии»

**XXIV Петербургские чтения по проблемам прочности
и
III молодежная школа-семинар
«Механика, химия и новые материалы»**

23-25 апреля 2024 года, Санкт-Петербург, Россия

**Сборник
материалов конференции**

Санкт-Петербург

2024

УДК 539.4
ББК 34
П29

Рецензенты:

д. ф. м. н. Беляев С. П. (СПбГУ), д. ф. м. н. Реснина Н. Н. (СПбГУ)

П29 **XXIV Петербургские чтения по проблемам прочности и III молодежная школа-семинар «Механика, химия и новые материалы»**, 23–25 апреля 2024 года, Санкт-Петербург, Россия: сб. материалов.—СПб.: Изд-во ВВМ, 2024.— 122 с.

ISBN 978-5-9651-1570-9

Статьи публикуются в авторской редакции

III молодежная школа-семинар «Механика, химия и новые материалы»
проведена при поддержке Мегагранта № 075-15-2022-1114

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | стр |
|---|-----|
| Р.З. Валиев, Новые исследования в области парадокса прочности и пластичности в наноматериалах | 9 |
| Д.Л. Мерсон, С.В. Засыпкин, В.И. Костин, И.С. Ясников, А.В. Данюк, Исследование формирования и эволюции оксидных слоев на магниевых сплавах: теория и эксперимент | 10 |
| Г.В. Афонин, А.С. Макаров, Р.А. Кончаков, Е.В. Гончарова, Н.П. Кобелев, В.А. Хоник, Высокоэнтропийные металлические стекла: что это означает с физической точки зрения | 11 |
| В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., М.С. Ломач, С.В. Гусакова, Wenjing Wang, Xuefeng Liu, Yaohua Yang, Ультразвуковое равноканальное угловое прессование металлических материалов | 12 |
| А.Л. Колесникова, А.П. Чернаков, М.Ю. Гуткин, А.Е. Романов, Круговые призматические дислокационные петли в композитных нанопроволоках | 13 |
| Р.Б. Моргунов, Критический анализ магнито-резонансной пластичности кристаллов | 14 |
| А.В. Шеляков, Н.Н. Ситников, Д.А. Хачатрян, Функциональные свойства быстрозакаленного аморфно-кристаллического сплава TiNiCu | 15 |
| М.А. Сокоиков, М.Ю. Симонов, В.В. Чудинов, В.А. Оборин, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк, Механические и микроструктурные аспекты пластической локализации при различных видах нагружения как результата самоорганизованного поведения ансамблей микродефектов | 16 |
| М.В. Нарыкова, Б.К. Кардашев, В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, А.А. Левин, А.И. Лихачев, Прогнозирование образования зоны разрушения в алюминиевых проводах А50 на основе анализа структурных и механических характеристик | 17 |
| Ю.В. Соловьева, Я.Д. Липатникова, В.А. Старенченко, И.Г. Вовнова, Пластическая деформация и разрушение металлов и сплавов в 3D модели синтеза дислокационной кинетики и механики деформируемого твердого тела | 18 |
| В.А. Ермишкин, Н.А. Минина, Н.А. Палий, Взаимосвязь механических характеристик и структурных параметров монокристаллов молибдена по данным экспериментов in situ | 19 |
| А.И. Базлов, Е.В. Убийвовк, Е.Н. Занаева, И.В. Строчко, Влияние микроструктуры слитков сплавов $(Fe_{0,25}Ni_{0,25}Co_{0,25}Cr_{0,125}(Mo,V)_{0,125})_{83}B_{17}$ на стеклообразующую способность | 20 |
| Р.А. Голубев, А.Р. Егоров, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник, О.М. Хубиев, Д.С. Солохо, Д.И. Семенкова, А.С. Критченков, Ультразвуковой синтез слоистых двойных гидроксидов | 21 |
| Д.Ф. Горбаченко, Ф.С. Беляев, А.Е. Волков, М.Е. Евард, Компьютерное моделирование рабочего цикла привода с памятью формы, работающего на кручение | 22 |
| Т.В. Ребров, Ф.С. Беляев, А.Е. Волков, Е.А. Вуколов, Согласованное описание при микроструктурном моделировании эффекта стабилизации мартенсита в никелиде титана после задания предварительной деформации разными способами | 23 |
| М.С. Стародубова, Ф.С. Беляев, А.Е. Волков, М.Е. Евард, Теоретическое исследование зависимости движения крутильного маятника с элементом из спф от амплитуды вынуждающих колебаний | 24 |
| К.В. Кудрина, Ф.С. Беляев, А.Е. Волков, Е.А. Вуколов, М.Е. Евард, Теоретическое исследование влияния скорости нагружения на распределение температур и деформацию в образцах из сплавов с памятью формы | 25 |

| | |
|--|----|
| С.А. Марченко, Ф.С. Беляев, А.Е. Волков, М.Е. Евард, Е.С. Остропико, Теоретическое исследование влияния выдержек во времени на релаксацию напряжений в устройствах с элементами из сплава с памятью формы CuZnAl | 26 |
| Д.М. Пашковский, Расчет тензора вклада в диффузию для неоднородности в форме суперэллиптического цилиндра | 27 |
| Н.А. Гасратова, И.Д. Шашкин, Исследование влияния атмосферных явлений на физико-механические свойства полиметилметакрилата (ПММА) марки PLEXIGLAS GS 0Z00 | 28 |
| П. Манякин, Я.В. Конаков, О.Ю. Курапова, И.Ю. Арчаков, Изучение высокотемпературной прочности YSZ керамики | 29 |
| А.Е. Майер, Е.В. Фомин, Н.А. Грачёва, В.В. Погорелко, П.Н. Майер, Б.А. Панченко, Гибридные модели материалов с использованием методов машинного обучения | 30 |
| Е.В. Фомин, А.Е. Майер, Исследование траекторий пластической деформации в ГЦК металлах и их аппроксимация глубокими рекуррентными нейронными сетями | 31 |
| Б.А. Панченко, А.Е. Майер, Разработка межатомного потенциала и тензорного уравнения состояния Al и Cu на основе нейронных сетей | 32 |
| Ю.Н. Коэмец, И.В. Ежов, Н.В. Казанцева, О.А. Коэмец, Структура и механические свойства канюлированного имплантата после экстремальной нагрузки | 33 |
| И.С. Критченков, А.Х. Критченкова, А.С. Критченков, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), Д.И. Семенкова, Р.А. Голубев, Биосовместимые композитные сенсоры температуры тела человека на основе фосфоресцентного кластера меди(I) и полисахаридных биополимеров | 34 |
| Н.В. Казанцева, М.В. Ильных, В.П. Кузнецов, Расчет усталостной долговечности медицинских имплантатов, полученных методом 3D-печати | 35 |
| А.О. Онищенко, И.В. Ежов, Н.В. Казанцева, Имитационное моделирование усталостного поведения канюлированного винта | 36 |
| В.А. Брызгалов, Е.А. Корзникова, Первопринципное моделирование адсорбции кислорода на поверхности биорезорбируемого цинкового сплава Zn-nAg-Cu | 37 |
| Н.А. Дегтярев, Решение задачи изгиба секторальной пластины с использованием систем компьютерной алгебры | 38 |
| Е.Г. Астафурова, С.В. Астафуров, Е.В. Мельников, А.В. Лучин, Д.О. Астапов, Д.Ю. Гуртова, Влияние отклонения от эквиатомного состава и уменьшения числа компонентов в сплаве CoCrFeMnNi на температурную зависимость его механических свойств | 39 |
| С.А. Быкова, Е.А. Иванова, Микрополярный континуум и уравнения электродинамики подвижной среды | 40 |
| Е.С. Емельянова, А. Бородина, Е.М. Дымнич, В.С. Шахиджанов, В.А. Романова, Анализ деформационного поведения силумина, изготовленного методом селективного лазерного плавления, на мезо- и макроуровнях | 41 |
| Т.С. Орлова, Д.И. Садыков, А.М. Мавлютов, М.Ю. Мурашкин, Повышение пластичности высокопрочных ультрамелкозернистых низколегированных сплавов Al-Mg-Zr в температурной области 77-300 К | 42 |
| А.Н. Кочанов, И.Ж. Бунин, А.И. Тюрин, Особенности разрушения горных пород при различных видах внешних энергетических воздействий | 43 |
| Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, Д.И. Фролов, Ю.С. Кривососов, А.В. Бузмаков, Эволюция дефектной структуры и признак перехода к критическому («опасному») состоянию материала: модель дискретных элементов и эксперимент | 44 |

| | |
|---|----|
| Ю.Г. Пронина, М.Л. Качанов, М.В. Нарыкова, О влиянии пористости на упругие свойства материалов | 45 |
| М.Н. Кривошеина, Е.В. Туч, Влияние величин коэффициентов Пуассона на процесс распространения упругих волн | 46 |
| Е.А. Корзникова, В.А. Брызгалов, А.С. Семёнов, С.В. Дмитриев, Исследование сжатия двумерных материалов | 47 |
| В.В. Вяльцева, Ю.Г. Пронина, М.Л. Качанов, Об оценке трехмерной плотности трещин по их следам на поверхностях сечений | 48 |
| Н.С. Селютина, Сравнительный анализ моделей для прогнозирования эффекта стабилизации пластической деформации | 49 |
| Д.Д. Хайретдинова, Н.С. Селютина, Динамическое и усталостное разрушение слоистых композитов | 50 |
| Р.В. Лукашов, С.А. Атрошенко, Г.А. Волков, Е.С. Остропико, А.А. Груздков, Влияние ударного нагружения по методу Тейлора на поведение крупнозернистой и ультрамелкозернистой меди | 51 |
| Д.А. Бояршинов, О.Ю. Сметаников, Определение вязко-гиперупругих констант материала по данным циклических испытаний | 52 |
| М.Н. Антонова, Ю.В. Петров, Определение критических характеристик упругопластического разрушения образцов с различным размером зерен | 53 |
| Р.В. Лукашов, Г.А. Волков, Аналитический метод определения скоростной чувствительности характера разрушения бетонов с различным наполнителем | 54 |
| Д.А. Петров, М.Ю. Гуткин, А.Л. Колесникова, А.Е. Романов, Поля напряжений и упругая энергия прямолинейной краевой дислокации в упругом шаре | 55 |
| Л.А. Игушева, Прочностные характеристики термически обработанных горных пород | 56 |
| В.А. Морозов, Ю.В. Петров, В.М. Кац, А.Б. Яковлев, В.С. Иванов, П.С. Платонов, Экспериментальное исследование электрической прочности пленочных полимерных диэлектриков в широком диапазоне скоростей нарастания напряжений | 57 |
| П.К. Кабанова, А.Б. Фрейдин, Численное моделирование эволюции областей новой фазы в теле с концентраторами напряжений | 58 |
| А.Б. Иванова, А.Б. Фрейдин, Моделирование распространения фронта химической реакции в вязкоупругом теле | 59 |
| У.П. Карасева, А.Б. Фрейдин, Об учёте напряжений в моделях неравновесной вязкости | 60 |
| И.А. Рублев, А.Б. Фрейдин, Начально-краевая задача механохимии в упругой цилиндрической области | 61 |
| И.А. Ковалев, А.Л. Колесникова, М.Ю. Гуткин, Упругая задача о квантовом кольце вблизи свободной поверхности полупространства | 62 |
| М.М. Пегливанова, Моделирование изгиба пластин с градиентом пластических свойств | 63 |
| А.В. Кануткин, П.А. Радченко, С.П. Батуев, А.В. Радченко, Моделирование поведения многослойных металлокерамических преград при высокоскоростном нагружении | 64 |
| Г.Ф. Корзникова, А.Ф. Алетдинов, Е.А. Корзникова, Микроструктура и механические свойства медноматричного композита с графеном, полученного методом кручения под высоким давлением | 65 |
| И.Е. Пермякова, Структурно-фазовые изменения и механическое поведение слоистых аморфно-нанокристаллических композитов, деформированных в камере Бриджмена | 66 |

| | |
|--|----|
| Э.Н. Занаева, А.И. Базлов, Структура и магнитные свойства аморфных сплавов на основе системы Fe-Co-Cr-Si-B после термической обработки | 67 |
| Э.В. Галиева, Е.Ю. Классман, В.А. Валитов, Р.Р. Габбасов, Твердофазная сварка сплавов на основе никеля ЭП741НП//ВКНА-25 | 68 |
| А.Е. Волков, Е.В. Черняева, Н.А. Казаринов, Н.А. Волкова, Проблемы оценки изменения состояния металлов посредством исследования сигналов акустической эмиссии | 69 |
| С.А. Атрошенко, Р.З. Валиев, Н.Ф. Морозов Р.Р. Валиев, Я.Н. Савина, М.Н. Антонова, А.Д. Евстифеев, Влияние высокоскоростной эрозии на поведение титанового сплава ВТ6 с покрытием TiN | 70 |
| Ю.М. Бойко, В.А. Марихин, Л.П. Мясникова, Статистические аспекты механического поведения высокопрочных полимерных материалов | 71 |
| В.М. Мишин, Г.А. Филиппов, Д.В. Щитов, Переход механики замедленного разрушения в микромеханику | 72 |
| Е.Е. Дамаскинская, Д.И. Фролов, Е.Ю. Нефедьев, Л.О. Стояновский, Исследование роста трещины в стали 08ГДНФЛ методами акустической эмиссии и растровой электронной микроскопии | 73 |
| П.О. Русинов, Г.В. Курапов, М.Д. Семадени, Исследование структуры и свойств гибридного композита | 74 |
| Р.М. Бикбаев, Н.Н. Реснина, С.П. Беляев, I.A. Palani, T. Geethapriyan, Функциональное поведение сплава TiNi, полученного методом послойной электродуговой наплавки | 75 |
| А.А. Мухаметгалина, Э.Р. Шаяхметова, М.А. Мурзинова, А.А. Саркеева, А.А. Назаров, Влияние состояния поверхности листов меди на качество их соединений, полученных ультразвуковой сваркой | 76 |
| С.М. Ковалев, А.В. Орехов, Г.В. Павилайнен, Локальная прочность льда и его использование в качестве основы вертолётных прощадок при их эксплуатации в районах крайнего севера | 77 |
| А.В. Сибирев, С.П. Беляев, Н.Н. Реснина, Многоцикловая функциональная усталость NiTi, применяемого в качестве рабочего тела торсионного привода | 78 |
| А.М. Иванов, С.П. Беляев, Н.Н. Реснина, Особенности деформирования сплава Ti-51 ат.% Ni с памятью формы при изотермической выдержке под постоянным напряжением | 79 |
| Н.А. Грачёва, Е.В. Фомин, А.Е. Майер, модель структурных фазовых переходов в Al-Cu сплавах | 80 |
| Д.О. Астапов, К.А. Реунова, Е.Г. Астафурова, Д.Ю. Гуртова, Температурная зависимость механических свойств многокомпонентных сплавов CoCrFeMnNi и CoCrNi | 81 |
| В.И. Бетехтин, М.В. Нарыкова, А.Г. Кадомцев, Ю.Р. Колобов, С.С. Манохин, О.В. Амосова, Роль нанопористости и состояния поверхности при длительных испытаниях титана ВТ1-0 | 82 |
| Е.Б. Борисенко, Н.Н. Колесников, Б.С. Редькин, В.И. Орлов, А.В. Тимонина, Пластическая деформация и дефекты структуры кристаллов CdWO ₄ | 83 |
| Д.Д. Гатиятуллина, А.В. Землянов, Р.Р. Балохонов, И.Р. Ивашов, Двухуровневый подход к исследованию влияния прослойки на деформацию и разрушение дендритной структуры аддитивного алюминиево-кремниевого сплава | 84 |
| В.М. Бузник, В.В. Родаев, А.А. Самодуров, В.М. Васюков, Д.Ю. Головин, С.С. Разливалова, А.И. Тюрин, Ледовые композиты, упрочненные органическими и неорганическими наночастицами | 85 |

| | |
|---|-----|
| Ж.В. Гудкина, Дислокационная активность микропор в профилированном сапфире по данным фазово-контрастного изображения и топографии в синхротронном излучении | 86 |
| Д.Ю. Гуртова, Д.О. Астапов, Е.Г. Астафурова, Водородное охрупчивание высокоэнтропийного сплава $Fe_{20}Cr_{20}Ni_{20}Mn_{20}Co_{19,2}N_{0,8}$, подвергнутого старению | 87 |
| Н.П. Богданов, М.Ю. Дёмина, Влияние вида термосиловой траектории деформирования при кручении на рост необратимых деформаций в никелиде титана | 88 |
| Р.Р. Загитов, О.Ш. Ситдилов, Е.В. Автократова, С.В. Крымский, В.В. Терешкин, О.Э. Латыпова, М.В. Маркушев, Структура и механические свойства алюминиевого сплава 1570С, подвергнутого всесторонней ковке и криогенной прокатке | 89 |
| П.В. Исхакова, С.В. Колосов, С.А. Баранникова, Локализация деформации в условиях низких температур | 90 |
| А.Ю. Киселев, Л.С. Метлов, Г.А. Волков, Ю.Н. Выюненко, Эволюция геометрических параметров кольцевых силовых пучковых элементов, обусловленная обратимой памятью формы | 91 |
| М.С. Кищик, А.Д. Котов, Эволюция микроструктуры сплава ЛС59-1 в процессе всесторонней изотермическойковки | 92 |
| А.А. Кищик, О.А. Яковцева, М.С. Кищик, А.В. Михайловская, Высокоскоростная сверхпластичность сплавов Al-Mg-Mn с добавками Ni и Fe | 93 |
| А.В. Комельков, А.В. Нохрин, А.А. Бобров, Исследование термической стабильности структуры и свойств тонких проводов из сплавов Al-Zr | 94 |
| Д.А. Конотоп, П.В. Максимов, Разработка и анализ математических моделей инерциальных измерительных устройств | 95 |
| С.В. Крымский, Е.В. Автократова, В.В. Терешкин, О.Ш. Ситдилов, М.В. Маркушев, Эффект криопротекции на межкристаллитную коррозию алюминиевого сплава 1965 | 96 |
| А.М. Лексовский, Б.Л. Баскин, В.Р. Ржевкин, П.Н. Якушев, Г.В. Ваганов, Ш.Ш. Азимов, Л.В. Тихонова, М.Ф. Киреевко, Характеризация процесса формирования критичности пластической деформации твердого тела по данным линейной локации и частотного спектра мощности акустической эмиссии на примере стали ЗПС | 97 |
| Н.О. Ливанова, Г.А. Филиппов, Н.А. Демиров, Исследование влияние остаточных микронапряжений на склонность высокоуглеродистой стали к замедленному хрупкому разрушению | 98 |
| А.В. Лучин, Д.Ю. Гуртова, Е.Г. Астафурова, Микроструктура, фазовый состав и механические свойства среднеэнтропийного сплава $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$, легированного азотом | 99 |
| В.В. Малашенко, Т.И. Малашенко, Влияние наводороживания на неупругие процессы в металлах | 100 |
| А.С. Мальцев, О.Ю. Сметаников, Определение вязкоупругих свойств клея на основе вибрационных испытаний | 101 |
| А.Г. Мочуговский, А.В. Михайловская, Влияние всестороннейковки на микроструктуру и свойства сплава Al-Mg-Si | 102 |
| С.С. Манохин, Д.А. Колесников, И.В. Неласов, Д.В. Лазарев, В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова, Ю.Р. Колобов, Влияние ползучести на микроструктуру алюминиевого сплава АД1 в рекристаллизованном и ультрамелкозернистом состояниях | 103 |
| Л.В. Мухамедзянова, В.В. Бобырь, Т.В. Князюк, Исследование химического состава, микроструктуры и твердости мартенситной нержавеющей стали, изготовленной методом прямого лазерного выращивания | 104 |

| | |
|--|-----|
| Е.Д. Назарова, Численное моделирование поведения различных видов сварных соединений на основе экспериментальных исследований | 105 |
| А.С. Нифонтов, Е.Г. Астафурова, Влияние наводороживания на микромеханизмы разрушения сплава Кантора с различной микроструктурой | 106 |
| И.В. Поникарова, Н.Н. Реснина, С.П. Беляев, А.В. Сибирев, М.Е. Трофимова, А.И. Базлов, Изменение функциональных свойств при термоциклировании литого сплава $Ti_{40,7}Hf_{9,5}Ni_{44,8}Cu_5$ | 107 |
| В.А. Оборин, М.В. Банников, М.А. Сокоиков, О.Б.Наймарк, Нагружение титанового сплава ВТ-8 при комбинированном динамическом и последующем гигацикловом | 108 |
| Д.Э. Сафарова, К.О. Базалева, Ю.Ю. Понкратова, Р.Б. Шипшев, Влияние технологических параметров прямого лазерного выращивания на структуру и свойства сплава ВТ23 | 109 |
| М.В. Сергеев, Р.Р. Балохонов, Особенности динамического деформирования и разрушения поликристаллического алюминия | 110 |
| Н.В. Скиба, М.Ю. Гуткин, Эмиссии решеточных дислокаций из тройных стыков границ зерен в высокотемпературных керамиках с аморфными межкристаллитными прослойками | 111 |
| В.В. Терешкин, М.А. Ахметшин, Е.В. Автократова, С.В. Крымский, О.Ш. Ситдииков, М.В. Маркушев, Эффект изотермической деформации горячей ковкой и криогенной прокаткой на избыточные фазы в высокопрочном алюминиевом сплаве | 112 |
| А.Б. Тохметова, Е.Ю. Панченко, Ю.И. Чумляков, Циклическая стабильность больших обратимых деформаций в мартенситном состоянии в монокристаллах сплава $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ | 113 |
| А.И. Тюрин, А.А. Самодуров, В.А. Шамаев, В.В. Коренков, В.А. Тюрин, М.А. Юнак, Исследование структуры и картирование физико-механических свойств годовых колец древесины лиственных и хвойных пород методами наноиндентирования и скретч-теста | 114 |
| В.П. Тютин, М.Г. Исаенкова, Н.А. Михалёв, Э.Ю. Суарес, Д.С. Сухоруков, Влияние ниобия на эволюцию текстуры прокатки меди при повышении доли ниобия в сплавах системы Cu-Nb | 115 |
| О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов, Г.Ю. Романовский, Исследование влияния режимов деформационной обработки на механические свойства и хладостойкость сверхнизкоуглеродистой мартенситной стали | 116 |
| Э.И. Усманов, Я.Н. Савина, Р.Р. Валиев, Р.З. Валиев, А.В. Панин, высокопрочное состояние 3d-напечатанного титанового сплава ВТ6, подвергнутого ИПД обработке | 117 |
| А.А. Чуракова, Оценка изменения механической прочности и коррозионно-усталостной долговечности сплава TiNi при испытаниях в коррозионной среде | 118 |
| И.В. Шакиров, Т.В. Князюк, П.А. Кузнецов, М.С. Михайлов, Прочность и пластичность стали X18H10T, полученной методами селективного лазерного сплавления и прямого лазерного выращивания, в зависимости от различных режимов термообработки | 119 |
| Э.Р. Шаяхметова, М.А. Мурзинова, А.А. Мухаметгалина, А.А. Саркеева, А.А. Назаров, Влияние распределения нормальных деформаций на дефектность соединений меди, полученных ультразвуковой сваркой | 120 |
| И.З. Шарипов, Стабильность функциональных характеристик сплава с памятью формы $Ni_{49,8}Ti_{50,2}$ при термоциклировании | 121 |
| М. Писарев, В.А. Романова, Е.С. Емельянова, О.С. Зиновьева, Р.Р. Балохонов, Экспериментальное исследование эволюции деформационного рельефа в образцах аддитивно изготовленной стали | 122 |

НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПАРАДОКСА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ В НАНОМАТЕРИАЛАХ

Р.З. Валиев^{1,2}

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
ruslan.valiev@ugatu.su

Кристаллические материалы могут проявлять сверхпрочность или высокую пластичность, но редко сочетают оба эти свойства одновременно в силу физической природы их пластической деформации, которая определяется подвижностью дислокаций, т.е. линейных дефектов кристаллической решетки в теле зерна/кристаллита. Это также справедливо в отношении наноструктурных материалов с очень маленькими размерами зерен в нанометрическом диапазоне. В то же время, в последние годы был разработан и предложен ряд оригинальных подходов для достижения как высокой прочности, так и пластичности в наноматериалах, в частности, полученных обработкой методами интенсивной пластической деформации (ИПД). ИПД обработка позволяет формировать не только ультрамелкозернистые структуры с размером зерен менее 1000 нм в металлах и сплавах, но и, оказывая влияние на фазовые превращения, приводить к образованию разных наноструктурных особенностей – наноразмерных выделений, нанодвойников, сегрегаций примесей и легирующих элементов на границах зерен. В настоящем докладе представлен анализ недавно разработанных подходов, направленных на достижение одновременно очень высокой прочности и пластичности в различных металлических наноматериалах. Рассмотрены физические принципы их реализации, основанные на активной роли границ зерен и связанных с ними механизмов деформации, – зернограничного проскальзывания, вращения зерен, диффузии и т.д. Представлены и обсуждаются примеры обеспечения высокой прочности и пластичности в серии наноструктурных легких сплавов на основе Al, Mg и Ti, а также ряде сталей. Показана важность комбинации высоких прочности и пластичности для повышения служебных свойств наноматериалов – усталости, ударной вязкости и трещиностойкости.

Доклад выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00445).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ НА МАГНИЕВЫХ СПЛАВАХ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Д.Л. Мерсон, С.В. Засыпкин, В.И. Костин, И.С. Ясников, А.В. Даниюк

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

d.merson@tlt.su

С целью снижения веса летательных аппаратов корпуса авиационных двигателей часто изготавливают из литейных магниевых сплавов, одним из основных недостатков которых является относительно низкая температура воспламенения ($T_{\text{вп}}$, как правило, ниже 700°C). Для повышения безопасности эксплуатации авиационной техники стоит серьезная задача по повышению $T_{\text{вп}}$ свыше 1000°C при одновременном увеличении прочностных характеристик. Основным способом повышения $T_{\text{вп}}$ является защита поверхности за счет формирования на ней оксидных слоев легирующих элементов.

Для исследования были выбраны 5 литейных сплавов на основе магния: коммерческий сплав МЛ10 ($0.5\text{Zn}-0.6\text{Zr}-2.2\text{Nd}$), три сплава системы, содержащей LPSO-фазу, $6.8\text{Y}-2.5\text{Zn}-\text{X}$ (где X: 0.6Zr , 1.5Ca , 0.5Yb) и сплав $14\text{Gd}-2\text{Zn}-0.5\text{Zr}-0.5\text{Yb}$, остальное Mg, все в вес.%. Для выяснения кинетических особенностей роста оксидной пленки образцы данных сплавов выдерживали в печи при температуре 350°C в течение 5 часов (первый эксперимент) и 48 часов (второй эксперимент). Анализ структуры и состава слоев (пленки) на образцах магниевого сплава проводили с применением растрового электронного микроскопа Sigma Zeiss с системой рентгеноспектрального элементного микроанализа EDS EDAX Apollo X.

Для каждого исследуемого сплава методами химической термодинамики были найдены стандартные изменения энергии Гиббса при двух температурах (350°C и 700°C) и проведены оценки возможности образования оксидов как магния, так и легирующих элементов.

На основании проведенного термодинамического анализа и исследования оксидных пленок были сделаны следующие основные выводы.

1) Основные реакции получения оксидов как магния, так и легирующих элементов это реакции непосредственного окисления соответствующих элементов и, чем более отрицательное по модулю значение изменения энергии Гиббса, тем интенсивнее происходит данная реакция.

2) Исследуемые элементы по модулю отрицательных значений располагаются в следующей последовательности: $\text{Y} > \text{Ca} > \text{Gd} > \text{Yb} > \text{Nd} > \text{Mg} > \text{Zr} > \text{Zn}$, т.е. при наличии в сплаве иттрия именно он будет в первую очередь формировать на поверхности оксидную пленку.

3) Исследование структуры оксидных пленок на поверхности магниевых сплавов, сформированных при 350°C показало, что наиболее интенсивно по толщине пленки растут в сплавах, содержащих Gd и Ca. Однако толщина пленки – это еще не гарантия защиты магния от окисления, т.к. она может быть рыхлой (не достаточно плотной).

4) При 700°C в первую очередь формируется пленка на основе оксида иттрия, причем наличие в сплаве иттербия способствует ее существенному уплотнению.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания FEMR-2023-0003.

ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СТЕКЛА: ЧТО ЭТО ОЗНАЧАЕТ С ФИЗИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Г.В. Афонин¹, А.С. Макаров¹, Р.А. Кончаков¹, Е.В. Гончарова¹, Н.П. Кобелев²,
В.А. Хоник¹

¹Воронежский государственный педагогический университет, Воронеж, Россия

²Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия
v.a.khonik@yandex.ru

В середине 2000-х годов в литературе появились публикации о так называемых высокоэнтропийных металлических стеклах (ВЭМС), содержащих 5 или более металлических компонентов в концентрации от 5 до 35 ат.%. Эти стекла характеризуются большой энтропией смешения $\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^N c_i \ln c_i$, где R - универсальная газовая постоянная, c_i - атомная доля i -го элемента и N – число элементов. Для данного набора химических элементов, составляющих стекло, энтропия смешения максимальна в случае эквиатомного состава.

Многочисленные исследования показали, что ВЭМС имеют относительно высокую термическую стабильность, низкую атомную подвижность, замедленную диффузию и кинетику кристаллизации, хорошие механические и магнитные свойства, высокую устойчивость к облучению. Иногда утверждается, что ВЭМС сочетают высокие свойства как стандартных металлических стекол (МС), так и кристаллических высокоэнтропийных сплавов. При этом указанная формула для расчета ΔS_{mix} учитывает только число элементов и их атомные доли, но не принимает во внимание химическую природу этих элементов, межатомные связи, изменения энтропии при стекловании расплава, скорость закалки расплава и другие характеристики реальных МС. Возникает тогда вопрос о физической природе структурного состояния и свойств ВЭМС. Убедительные ответы на этот вопрос в литературе отсутствуют.

Нами проведены калориметрические исследования 30-ти МС с энтропиями смешения $\Delta S_{mix}/R$ от 0.8 для простых 3-х компонентных стекол до 1.8 для 6-компонентных эквиатомных ВЭМС. На этой основе рассчитаны температурные зависимости избыточной энтропии ΔS по отношению к материнскому кристаллическому состоянию. Показано, что избыточные энтропии ΔS МС при всех характеристических температурах (комнатной температуре, температуре стеклования и температуре пика ΔS в состоянии переохлажденной жидкости) убывают с энтропией смешения ΔS_{mix} . При этом избыточная энтропия ΔS прямо отражает степень структурной неупорядоченности стекла и его склонность к релаксации при термообработке. Поэтому следует сделать вывод о том, что так называемые «высокоэнтропийные стекла» (т.е. стекла с высокой энтропией смешения ΔS_{mix}) являются наиболее упорядоченными и наименее склонными к релаксации свойств при термообработке. Имеющиеся в литературе данные о свойствах ВЭМС подтверждают этот вывод.

Работа поддержана Российским научным фондом в рамках проекта № 23-12-00162.

**УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РАВНОКАНАЛЬНОЕ УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ****В.В.Рубаник¹, В.В. Рубаник мл.¹, М.С. Ломач¹, С.В. Гусакова², Wenjing Wang³,
Xuefeng Liu³, Yaohua Yang³**¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь³Пекинский университет науки и техники, Пекин, Китай

ita@vitebsk.by

Интерес к ультрамелкозернистым и наноструктурным материалам обусловлен их уникальными физико-механическими и служебными свойствами. Естественно, это вызвало необходимость разработки способов и технологических приемов их получения, т.е. способов интенсивной пластической деформации как процесса обработки металлов давлением. Одним из эффективных методов интенсивной пластической деформации (ИПД), предназначенных для получения объемных наноструктурных (НС) материалов, является равноканальное угловое прессование (РКУП).

Физический смысл процесса РКУП, предложенного в 1973 г. В. Сегалом и развитого Р. Валиевым с соавторами, заключается в реализации простого сдвига в зоне пересечения двух каналов равного поперечного сечения, выполненных в монолитной или разъемной матрице, при проталкивании через них металлической заготовки.

Среди многих недостатков РКУП основными являются неоднородность структуры образцов и большие деформационные усилия. Эти недостатки обусловлены силой трения между заготовкой и матрицей. Причем, чем больше поверхность соприкосновения между пуансоном и матрицей т.е. геометрические размеры заготовки, тем больше деформационные усилия и неоднородность физико-механических свойств получаемых образцов.

Для снижения деформационных усилий предложены различные приемы и устройства. Одним из которых является применение мощных ультразвуковых колебаний (УЗК). Однако эффективные способы введения УЗК в очаг деформации при РКУП отсутствуют. Нами разработано оригинальное устройство РКУП в котором матрица одновременно является и частью волноводной системы в которой возбуждаются УЗК частотой ~ 22 кГц с амплитудой смещений до 50 мкм и более. Это позволило снизить усилие деформирования заготовок из Zn, Al и биметалла Cu-Ag от 1,5 до 4 раз, а также улучшить структуру и физико-механические свойства образцов.

Таким образом, РКУП с ультразвуковым воздействием является оправданным и может послужить новым научным направлением в обработке металлов давлением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T22КИТТ-011).

КРУГОВЫЕ ПРИЗМАТИЧЕСКИЕ ДИСЛОКАЦИОННЫЕ ПЕТЛИ В КОМПОЗИТНЫХ НАНОПРОВОЛОКАХ

А.Л. Колесникова^{1,2}, А.П. Чернаков³, М.Ю. Гуткин^{1,2,4}, А.Е. Романов²

¹Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

m.y.gutkin@gmail.com

Призматические дислокационные петли (ПДП) играют важную роль в процессах релаксации напряжений несоответствия в различных композитных наноструктурах, которые применяются в современных приборах и устройствах микро- и оптоэлектроники, фотоники и т.д. В частности, они выступают в качестве дислокаций несоответствия (ДН) в нанопроволоках, содержащих включения других материалов, и в нанопроволоках типа «ядро-оболочка». Как правило, разработчики и производители подобных композитных наноструктур стремятся избежать или свести к минимуму образование ДН, поскольку оно может приводить к существенному ухудшению служебных характеристик и к уменьшению продолжительности эффективной работы соответствующих приборов. Поэтому расчет критических условий появления ДН и их равновесной плотности в разных композитных наноструктурах вызывает большой интерес.

В настоящей работе рассматриваются два примера таких наноструктур. В первом случае это композитные нанопроволоки типа «ядро-оболочка», в которых неоднократно наблюдалось образование ДН в виде замкнутых ПДП. В качестве теоретической модели такой нанопроволоки рассмотрен составной цилиндр, ядро и оболочка которого изготовлены из материалов с одинаковыми упругими свойствами, но разными параметрами кристаллической решетки, что вызывает появление в нем упругого напряженно-деформированного состояния решеточного несоответствия. В рамках модели релаксация этого состояния происходит за счет образования на границе между ядром и оболочкой круговых ПДП. Расчет полей напряжений и упругой энергии такой ПДП, а также энергии парного взаимодействия таких ПДП в упругом цилиндре позволил определить критическое несоответствие, при котором становится энергетически выгодным образование первой петли ДН в этой системе, и рассчитать равновесное (оптимальное) расстояние между такими петлями для заданных радиусов ядра и оболочки нанопроволоки и величины решеточного несоответствия между ними. Показано, что результаты расчета хорошо согласуются с данными экспериментов для нанопроволок InAs/GaAs.

Во втором случае примером служили аксиально-неоднородные (сегментированные) нанопроволоки. В качестве теоретической модели был выбран длинный составной цилиндр, состоящий из двух соединенных торцами цилиндров равного диаметра с равными упругими свойствами, но разными параметрами кристаллической решетки. Для случая когерентного сопряжения решеток на поперечной границе раздела решена граничная задача теории упругости и исследовано напряженно-деформированное состояние вблизи границы. Показано, что эффективным механизмом релаксации этого состояния может служить образование круговой аксиальной ПДП на некотором небольшом удалении от границы. Критическими условиями релаксации являются либо превышение величиной несоответствия некоторого критического значения при заданном радиусе нанопроволоки, либо превышение радиусом нанопроволоки некоторого критического значения при заданном значении несоответствия. С ростом радиуса нанопроволоки критическая величина несоответствия уменьшается. Показано также, что оптимальное расстояние от ПДП до границы составляет порядка 0.15 диаметра нанопроволоки.

Таким образом, возможность образования круговых ПДП при выполнении определенных критических условий должна обязательно учитываться разработчиками и производителями композитных нанопроволок различной архитектуры.

КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТО-РЕЗОНАНСНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ КРИСТАЛЛОВ

Р.Б. Моргунов

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия
spintronics2022@yandex.ru

Изменение пластических свойств кристаллов во взаимно перпендикулярных постоянном и высокочастотном переменном магнитных полях в условиях электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) было обнаружено в работе Головина Ю.И. и Моргунова Р.Б. Эта работа возникла в процессе поиска причин магнито-пластического эффекта, открытого в ионных кристаллах ранее группой В.И.Альшица, и объяснила его в частном случае кристаллов NaCl спин-зависимыми переходами в комплексах примеси под действием магнитного поля. В дальнейшем изменение пластических свойств кристаллов в условиях магнитного резонанса было подтверждено во множестве работ разных авторов, в разных условиях и в разных материалах, что придало общность обнаруженному эффекту. Однако, не всегда условия экспериментов соответствовали именно парамагнитному резонансу. Нами приведены оценки физических ограничений на возбуждение и регистрацию ЭПР по частоте переменного магнитного поля и его ориентации, а также на принципиальные физические отличия разных типов магнитных резонансов и их проявлений в пластичности. Установлено, например, что в ряде случаев вместо ЭПР может наблюдаться ферромагнитный резонанс на крупных ферромагнитных преципитатах, возбуждение которого также приводит к изменению дислокационной подвижности в кристаллах и является новым более перспективным, с точки зрения приложений, физическим эффектом. Исследованы материалы с разными типами примесей, на которых возбуждается ЭПР, приводя к облегченному преодолению этих примесей, как центров закрепления, дислокациями. Показано, что оптические манипуляции электронным состоянием примесей, которые заключаются в их ионизации, приводят к изменению спектров ЭПР, регистрируемых по изменению пластичности.

Важным аспектом работы является оценка вклада кристаллического поля примесных атомов в величину потенциального барьера, преодолеваемого дислокациями при деформации кристалла. Это поле электростатического происхождения в ЭПР спектроскопии называется «полем лигандов» и именно оно характеризует тонкую структуру спектров, отвечает за количество и спин-орбитальное расщепление линий ЭПР. Поэтому спектры ЭПР, записанные по изменению подвижности дислокаций, могут нести информацию о высоте потенциального барьера, создаваемого для дислокаций атомами примеси, в которых возбуждается ЭПР.

Работа выполнена в рамках тематической карты Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН RAS FFSG-2024-0009.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА БЫСТРОЗАКАЛЕННОГО АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА TiNiCu**А.В. Шеляков, Н.Н. Ситников, Д.А. Хачатрян**

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

alex-shel@mail.ru

Способность слоистых аморфно-кристаллических лент из сплава TiNiCu, полученных методом спиннингования расплава, проявлять обратимый эффект памяти формы (ЭПФ) с деформацией изгибом позволяет создавать на их основе микромеханические инструменты (микропинцеты) для захвата и манипулирования микрообъектами. Для изготовления микропинцета его зажимные части (губки) из композитной ленты с ЭПФ соединяются с возможностью изгибаться навстречу друг другу при нагреве. Зазор микропинцета определяется длиной губок и величиной обратимого ЭПФ в ленте и может регулироваться в широком диапазоне от 1 до 500 мкм в зависимости от размера захватываемых микрообъектов. Важной характеристикой микропинцета является усилие, развиваемое губками при нагреве. С одной стороны оно должно быть достаточным для удержания захватываемого микрообъекта, а с другой стороны исключать возможность его повреждения из-за чрезмерного сжатия, особенно в случае манипулирования биологическими объектами. Настоящая работа посвящена исследованию обратимого ЭПФ в лентах из сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ (ат.%) с разной толщиной кристаллического слоя от 6 до 13 мкм, а также генерируемых ими усилий при изгибе за счет реализации ЭПФ. Часть образцов дополнительно подвергались процедуре омоложения с использованием криогенного термоциклирования.

Установлено, что величина обратимого ЭПФ определяется соотношением толщин кристаллического и аморфного слоев. При этом омолаживающая обработка может вызывать ее заметное увеличение, а также существенное сужение температурного гистерезиса формоизменения, что должно способствовать улучшению функциональных свойств микропинцетов на основе быстрозакаленных аморфно-кристаллических лент.

Для измерения усилия, создаваемого аморфно-кристаллическим композитом при изгибе, прямолинейный образец ленты закрепляли одним концом на подвижном держателе с микрометрической подачей, с помощью которой его подводили к касанию другим концом заостренного стержня, установленного на аналитических весах. Нагрев образца вызвал его изгиб вследствие реализации ЭПФ в кристаллическом слое, а при охлаждении образец возвращался в исходное состояние. В результате с помощью аналитических весов получали температурные зависимости усилий. Показано, что с уменьшением длины образца от 5 мм до 1 мм величина максимального усилия увеличивается более чем в два раза (в частности, от 10 мН до 25 мН). Установлено также влияние структуры ленты и криотермических обработок на ее силовые характеристики.

Работа выполнена за счет гранта РФФ (проект №23-29-00779).

МЕХАНИЧЕСКИЕ И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ КАК РЕЗУЛЬТАТА САМООРГАНИЗОВАННОГО ПОВЕДЕНИЯ АНСАМБЛЕЙ МИКРОДЕФЕКТОВ

**М.А. Сокоиков¹, М.Ю. Симонов², В.В. Чудинов¹, В.А. Оборин¹, С.В. Уваров¹,
О.Б. Наймарк¹**

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
Россия

sokovikov@icmm.ru

В данном исследовании изучается один из механизмов локализации пластической деформации обусловленный структурными переходами в ансамблях дефектов мезоуровня при различных видах нагружения.

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

Температурные поля в реализованных процессах высокоскоростного деформирования исследовались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Измеренная температура в зоне локализации не подтверждает традиционные представления о механизме локализации деформации, обусловленном термопластической неустойчивостью для исследованных материалов и реализованных режимах нагружения.

Проведены испытания образцов, специальной формы при динамическом и статическом нагружении с применением системы неинвазивного измерения деформаций StrainMaster. Построены поля перемещений и деформаций.

Сравнение экспериментально полученных полей температур и полей деформаций с результатами проведенного численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, дает удовлетворительное соответствие с точностью ~20%.

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

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

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ В АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДАХ А50 НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТРУКТУРНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

М.В. Нарыкова, Б.К. Кардашев, В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, А.А. Левин, А.И. Лихачев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия
Maria.Narykova@mail.ioffe.ru

В работе представлены данные по исследованию структурных, микроструктурных, упругих и микропластических свойств отдельных проволок провода А50 воздушных линий электропередач (ЛЭП) до и после лабораторных испытаний в режиме усталости. Воздействие именно в режиме усталостного нагружения, как показал анализ литературных данных, является одной из основных причин разрушения проводов. Целью настоящего исследования являлась также попытка предсказать область разрушения на основе анализа изменения изученных параметров проволоки А50.

Приводятся данные для образцов после испытаний в режиме циклического нагружения как доведенных до разрушения, так и после некоторого количества циклов в неразрушенном состоянии. Для дальнейших исследований испытанные проволоки были разделены на части - вблизи и вне зоны разрушения. Методами денситометрии, дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), XRD дифрактометрии и акустическим методом составного пьезоэлектрического вибратора были исследованы каждые части проволок после испытаний на усталость. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с аналогичными результатами для нового провода и после эксплуатации проводов А50 в условиях реального времени (длительность эксплуатации отдельных проводов составляла 62 года).

Анализ изменения модуля Юнга E , декремента δ_i и условного предела микротекучести σ_s (из акустических измерений) в совокупности с денситометрическими данными по уменьшению общей массовой плотности ρ образцов проволок, структурными данными (из XRD) по усилению преимущественной ориентации, увеличению параметра a кубической элементарной ячейки и сопутствующего уменьшения рентгеновской массовой плотности ρ_x приповерхностного слоя Al материала проволок толщиной $\sim 36 \mu\text{m}$, а также микроструктурными данными по изменению величины зёрен в проволоках (из EBSD), размеров кристаллитов D и формированию локальных микродеформаций ϵ_s в кристаллитах (из XRD) после циклических усталостных испытаний позволяет предположить наиболее вероятное место разрушения образца.

Сравнение структурных, микроструктурных, упругих и микропластических характеристик Al проволок из провода А50 показывает, что лабораторные циклические усталостные испытания отдельных Al проволок приводят к качественно тем же тенденциям изменения параметров по сравнению с эксплуатацией в естественных условиях в кабелях ЛЭП. Анализ полученных данных позволяет предсказать область разрушения в алюминиевых проводах. Результаты исследования имеют важное практическое значение для разработки методов и приборов неразрушающего контроля проводов ЛЭП.

Работа выполнена с использованием оборудования и программного обеспечения федерального ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург).

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В 3D МОДЕЛИ СИНТЕЗА ДИСЛОКАЦИОННОЙ КИНЕТИКИ И МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Ю.В. Соловьева, Я.Д. Липатникова, В.А. Старенченко, И.Г. Вовнова

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия
j_sol@mail.ru

Методом многоуровневого моделирования, основанного на синтезе модели механики деформируемого твердого тела и модели дислокационной кинетики, исследуются неоднородности пластической деформации и разрушение металлических материалов в условиях различных видов нагружений.

Проведенные расчеты показали, что на картины деформации при одноосном растяжении или сжатии образца влияют различные факторы (как внутренние, так внешние): немонотонность пластических свойств элемента среды; геометрические параметры образца; наличие или отсутствие концентраторов напряжений.

Получено несколько вариантов развития макрокартин пластического течения при одноосном растяжении: устойчивая локализация и последующее разрушение (устойчивая шейка); развитие деформации без устойчивой локализации (бегающая шейка); появление множественных шеек. Геометрические параметры образца также оказывают влияние на характер деформации: отношение длины к ширине образца $l/h < 3,7$ не дает формирование фронтов локализованной деформации на поверхности образца, деформация более однородна.

При одноосном сжатии рассмотрено несколько сценариев развития пластического течения элементарного объема деформируемой среды, приводящие к различным степеням макролокализации пластической деформации. Сценарий с интенсивным падением напряжений приводит к образованиям полос макролокализации пластической деформации. В случае немонотонной кривой упрочнения (когда за снижением напряжения следует его рост) локализация деформации останавливается, и деформация становится более однородной. Проанализировано влияние концентраторов напряжений в деформируемом объеме (разрезы на боковых гранях) при одноосном сжатии.

Решена задача расчета распределения плотностей дефектов различного типа в деформируемом объеме однофазных и слоистых (металл-интерметаллидных) образцов. Анализируются картины распределения плотности дислокаций и границ разориентации для разных степеней деформации при одноосном сжатии однофазных образцов интерметаллида со сверхструктурой $L1_2$ и чистого металла. Показаны существенные отличия в особенностях развития дефектной подсистемы, степени неоднородности и типах формирующихся субструктур. Проведено верификационное сравнение с натурным экспериментом.

Показано, что на основе предложенного подхода удается описать экспериментально наблюдаемые неоднородности пластической деформации различного типа. Получены картины распределения интенсивности пластических деформаций и напряжений, иллюстрирующие развитие полос макро- и суперлокализации при сжатии, формирование бегающей (распространяющейся) шейки при растяжении, множественных шеек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-22-00115.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОНОКРИСТАЛЛОВ МОЛИБДЕНА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ IN SITU

В.А. Ермишкин, Н.А. Минина, Н.А. Палий
ИМЕТ РАН, Москва, Россия
vermishkin@imet.ac.ru

Попытки выразить в аналитическом виде взаимосвязь механических свойств и структурных параметров до настоящего времени предпринимались по данным, главным образом, экспериментов *in situ*, проводимых в колонне высоковольтного электронного микроскопа. Основное достоинство таких исследований состоит в том, что их результаты в прямой и наглядной форме дают качественное представление о характере этой взаимосвязи, что же касается оценки количественных закономерностей, связывающих их механические и структурные переменные, то они требуют преодоления существенных методических трудностей. Они связаны с точностью измерений, как структурных параметров, так и механических свойств в условиях этих экспериментов. Прежде всего, отметим, что сам метод применим только для аморфных и монокристаллических материалов, так как в случае поликристаллических материалов зависимость результатов от конкретного набора размеров зерен не позволяет относить их ко всему материалу в целом. При оценке механических свойств нельзя воспользоваться опытом их измерения при испытаниях макроскопических образцов из-за несовершенства формы микрообразцов. Измерения напряжений по изгибу дислокаций и по реперам, наносимым на поверхность образцов, часто несовместимы по месту. В настоящей работе рассматриваются результаты, экспериментов *in situ*, проведенных на макроскопических плоских образцах из монокристаллов Mo с заданной кристаллогеометрией, подвергнутых растяжению в захватах универсальной испытательной машины с синхронной видео записью результатов наблюдений за рабочей поверхностью образцов с последующим кадрowym анализом фрагментов изображения с помощью фотометрического анализатора структурных изображений (ФАСИ). Последний представляет собой программно-аналитический компьютерный комплекс, позволяющий выделять зоны изображений, претерпевших структурные изменения с помощью их избирательного окрашивания, измерение площадей участков исследуемых фрагментов, окрашенных в заданные цвета, измерить их площади, построить спектральную кривую изображения, построенной в координатах «спектральная плотность – интенсивность отражения в выделенных интервалах спектра». С помощью спектральной кривой, построенной для последовательности выбранных фрагментов, находятся значения обобщенных структурных показателей φ_i . Умножив их значения на величину, соответствующих им напряжений, получаем два массива переменных: $\{\varphi_i \cdot \sigma_i\}$ и $\{\sigma_i\}$, поставив которые во взаимно однозначное соответствие, строим по ним зависимость $\{\varphi_i \cdot \sigma_i\} = f\{\sigma_i\}$, которая оказалась линейной с коэффициентом репрезентативности $R^2 > 0,9$. Эту зависимость можно рассматривать как градуировочную и использовать для оценки напряжений.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00320-2400.

**ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СЛИТКОВ СПЛАВОВ
(Fe_{0,25}Ni_{0,25}Co_{0,25}Cr_{0,125}(Mo,V)_{0,125})₈₃B₁₇ НА СТЕКЛООБРАЗУЮЩЮЮ
СПОСОБНОСТЬ**

А.И. Базлов, Е.В. Убийвовк, Е.Н. Занаева, И.В. Строчко

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
bazlov@misis.ru

Аморфные сплавы на основе железа находят свое применение не только в качестве магнитомягких сплавов, но и в качестве высокопрочных конструкционных сплавов, коррозионностойких и износостойких покрытий. В последние несколько лет, были разработаны квазивысокоэнтропийные сплавы на основе системы легирования Fe-Co-Ni-Cr-Mo-V, обладающие высокой способностью к аморфизации, высокими прочностными характеристиками и коррозионной стойкостью, сравнимой с нержавеющей стали аустенитного класса. Потенциальное применение таких материалов возможно в микроэлектромеханических системах или износостойких покрытиях. Замена молибдена на ванадий в данной системе легирования, приводит при закалке к формированию в структуре ленты кристаллов нитрида ванадия. Формирование тугоплавких устойчивых соединений в структуре слитков, негативно сказывается на аморфизации сплавов, так как такие соединения сложно растворимы и их кристаллизация трудноподавима в процессе закалки. Настоящая работа посвящена исследованию влияния структуры слитков-прекурсоров сплавов (Fe_{0,25}Ni_{0,25}Co_{0,25}Cr_{0,125}(Mo,V)_{0,125})₈₃B₁₇ на их стеклообразующую способность.

В работе получены сплавы (Fe_{0,25}Ni_{0,25}Co_{0,25}Cr_{0,125}(Mo,V)_{0,125})₈₃B₁₇ методом аргонодуговой плавки. Из полученных сплавов методом закалки расплава на вращающийся медный диск были получены ленты толщиной 25-30 мкм. Структура сплавов исследовалась методами рентгеновской дифракции, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

В работе проанализировано влияние химического состава сплава на структуру слитков. Определены фазовые и структурные составляющие. Установлено влияние малых добавок элементов-раскислителей на формирующуюся структуру слитка. Проанализированы зависимости формирования аморфной структуры лент из исследуемых сплавов от структурных особенностей слитков-прекурсоров. Показано, что формирование частиц тугоплавких стабильных боридов типа MeN при плавке, оказывает негативное влияние на последующие переделы сплава и формирование аморфной структуры при закалке. Предпочтительной для аморфизации является структура, состоящая из высокой объемной доли эвтектики и первичных кристаллов боридов Me₃B₂.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 22-79-10055.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИНТЕЗ СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДОВ

Р.А. Голубев^{1,2}, А.Р. Егоров¹, В.В. Рубаник², В.В. Рубаник², О.М. Хубиев¹,
Д.С. Солохо^{1,2}, Д.И. Семенкова^{1,2}, А.С. Критченков^{1,2}

¹Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия

²Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск,

Беларусь

platinist@mail.ru

Слоистые двойные гидроксиды (СДГ) широко применяются в различных областях от адресной доставки лекарств до катализа и первапорации. Однако подавляющее большинство исследований сосредоточено на получении СДГ классическим гидротермальным методом при соотношении катионов двух- и трехвалентного металла 1:2. В данной работе представлены результаты неклассического (ультразвукового) синтеза СДГ при соотношении металлов 1:3.

Важнейшие выводы можно сформулировать следующим образом: во-первых, образование фазы СДГ зависит от природы катионов металлов в паре Me^{2+}/Me^{3+} . Для изученных пар образование СДГ подтверждено только в случае Mg/Fe; во-вторых, кристалличность СДГ крайне также зависит от соотношения Me^{2+}/Me^{3+} . При увеличении содержания трехвалентного катиона Fe^{3+} существенно снижается кристалличность образующихся СДГ; в-третьих, ультразвуковая обработка в сочетании с повышенным гидростатическим давлением не только ускоряет процесс синтеза СДГ, но и повышает их кристалличность в сравнении с образцами, полученными в традиционных условиях.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые выявлены соотношения металлов и параметры ультразвукового воздействия, позволяющие значительно сократить время синтеза Mg/Fe СДГ с высокой степенью кристалличности. На основе выявленных закономерностей разработана методика ультразвукового синтеза Mg/Fe СДГ.

Полученные СДГ планируется использовать в качестве носителей фармацевтических субстанций для разработки лекарственных форм с пролонгированным высвобождением.

Авторы благодарят за финансовую поддержку отдельный проект «Ультразвуковой синтез слоистых двойных гидроксидов медицинского назначения» (Республика Беларусь).

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ПРИВОДА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ, РАБОТАЮЩЕГО НА КРУЧЕНИЕ **Д.Ф. Горбаченко¹, Ф.С.Беляев^{1,2}, А.Е.Волков¹, М.Е. Евард¹**

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт Проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
daniilgorbachenko@gmail.com

Сплавы с памятью формы (СПФ) обладают уникальными механическими свойствами, которые могут быть использованы при проектировании и изготовлении приводов. В последнее время повышенный интерес вызывают приводы с элементами из СПФ, работающими на кручение, что позволяет избежать влияния теплового расширения на функциональное поведение. В настоящей работе в рамках микроструктурной модели исследуется рабочий цикл такого привода и оптимизируются параметры, позволяющие добиться максимума работы в цикле.

В данной работе анализируется рабочий цикл привода с памятью формы, работающего на кручение. Цикл реализован по следующему принципу: модельный образец предварительно деформируется либо путем активного деформирования в мартенситном состоянии, либо путем охлаждения из аутенситного состояния под постоянной нагрузкой, и разгрузке в мартенситном), затем, в предположении, что один из торцов абсолютно жестко заделан, а для другого задана некоторая жесткость заделки, осуществляется термоциклирование через интервал температур мартенситного превращения. Рассчитана работа, совершенная в цикле, при разных фиксированных жесткостях. Показано, что зависимость работы от жесткости заделки является нелинейной: существует определенное оптимальное значение жесткости. Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Поскольку при работе реальных устройств возможны ситуации, когда рабочий элемент не успевает остыть до температуры, при которой полностью завершается прямое превращение, или нагреться до температуры, при которой заканчивается обратное превращение, или, напротив, испытывает перегрев, было исследовано влияние предельных температур цикла на производимую работу. Расчеты показали, что, как правило, удельная механическая работа увеличивается с увеличением степени полноты как прямого, так и обратного превращения, а перегревы не сказываются на работоспособности. Однако в случае учета эффекта стабилизации мартенсита при определенных значениях жесткости возникают ситуации, когда именно перегрев приводит к увеличению удельной работы.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 23-29-01006).

**СОГЛАСОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРИ МИКРОСТРУКТУРНОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ ЭФФЕКТА СТАБИЛИЗАЦИИ МАРТЕНСИТА В
НИКЕЛИДЕ ТИТАНА ПОСЛЕ ЗАДАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ**

Т.В. Ребров¹, Ф.С. Беляев², А.Е. Волков¹, Е.А. Вуколов¹

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт Проблем Машиностроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

st063189@student.spbu.ru

Сплавы с памятью формы (СПФ) используются в промышленности для создания термоактивируемых устройств. Важным фактором, который нужно учитывать для их корректной работы, является эффект стабилизации мартенсита (ЭСМ). Он влияет на температуру восстановления деформации. ЭСМ проявляется после предварительной деформации образца и вызывает смещение температур обратного мартенситного превращения. Предварительная деформация может быть задана разными способами, наиболее важными из которых являются активная деформация в мартенсите («первый»), охлаждение под постоянной нагрузкой («второй») и наведение мартенсита напряжениями («третий»). В работе использована микроструктурная модель для расчета изменения этой температуры, учитывающая различные факторы, влияющие на ЭСМ.

Ранее на основе гипотезы из работ С.П. Беляева с соавторами, в модель была введена переменная ζ , описывающая степень поврежденности межмартенситных границ и оказывающая влияние на сдвиг температур обратного превращения в СПФ, и предложены формулы:

$$d\zeta = k_1 \frac{(\Phi_M - \Phi_{crit})H(\Phi_M - \Phi_{crit})}{(1 - \Phi_{crit})(1 + k_3\zeta^2)} d\tilde{r}H(d\tilde{r}), \quad (1), \quad d\zeta = 0, \quad (3).$$

$$d\zeta = \frac{\zeta_1 - \zeta}{\Phi_M} d\Phi_M H(d\Phi_M), \text{ где}$$

$$\zeta_1 = k_2 \frac{(\Phi_M - \Phi_{crit})H(\Phi_M - \Phi_{crit})}{(1 - \Phi_{crit})} \tilde{r}, \quad (2),$$

Формула (1) служит для расчёта изменения поврежденности при силовой переориентации мартенсита, (2) – при прямом мартенситном превращении (МП), (3) – при обратном МП. k_1, k_2, k_3 — константы материала. Φ_M — объёмная доля мартенсита, Φ_{crit} — критическое значение объёмной доли мартенсита, при которой начинается рост поврежденности, H — функция Хевисайда, $\tilde{r} = \frac{\sum_{n=1}^N |\Phi_n - \Phi_M|}{N\Phi_M}$ — степень ориентированности мартенсита, N — количество вариантов мартенсита, Φ_n/N — объёмная доля n -ого варианта мартенсита.

В опубликованных ранее работах, проявление ЭСМ при первом и втором способах задания предварительной деформации рассматривалось отдельно. Целью настоящей работы стало согласование значений констант k_1, k_2, k_3 для корректного описания ЭСМ после активной деформации в мартенситном состоянии и охлаждения под нагрузкой с одинаковым набором параметров.

При помощи экспериментальных данных из работы С.П. Беляева с соавторами и теоретических данных о поврежденности в модели при различных способах предварительной деформации были подобраны константы для сплавов $Ti_{50}Ni_{50}$ и $Ti_{49}Ni_{51}$, что позволило описать ЭСМ как для первого, так и для второго способа задания предварительной деформации с единым набором значений констант.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-29-01006.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДВИЖЕНИЯ КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА С ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ СПФ ОТ АМПЛИТУДЫ ВЫНУЖДАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

М.С. Стародубова, Ф.С. Беляев, А.Е. Волков, М.Е. Евард

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
st063188@student.spbu.ru

При разработке виброзащитных устройств используют методы пассивного, полуактивного и активного контроля. При пассивном контроле вибраций применяются элементы с высокой демпфирующей способностью. Полуактивный контроль осуществляется при помощи изменения параметров системы, например, жесткости, внутреннего трения, за счет нагрева (охлаждения), включения магнитного поля и др. При активном контроле в процессе колебаний производится физико-механическое воздействие на систему, синхронизированное с колебаниями. Сплавы с памятью формы (СПФ) относятся к функциональным материалам, свойства которых меняются в зависимости от внешних условий (температуры, предварительной нагрузки и др.). Применение этих сплавов в производстве демпферов позволяет добиться лучшей устойчивости конструкций и уменьшения амплитуды колебаний. Использование СПФ открывает путь для пассивного и полуактивного управления вибрациями. При виброзащите с помощью деталей из СПФ важную роль играет температура, поскольку ее изменение влияет на механические характеристики сплава.

Известны исследования возможности управления колебаниями за счет элементов из СПФ. В частности, построены зависимости коэффициентов передачи ускорения и перемещения от частоты вынуждающих колебаний и температуры. Однако в этих работах не исследовалось влияние амплитуды вынуждающих колебаний и не учитывалась необратимая деформация в СПФ.

В данной работе выполнен расчет вынужденных колебаний крутильного маятника при разных амплитудах и частотах вынуждающих колебаний. Получена зависимость коэффициента передачи ускорений от частоты колебаний основания для маятника с рабочим элементом, находящимся в мартенситном состоянии. На основании результатов моделирования сделан вывод, что резонансная частота колебаний и коэффициент передачи ускорений зависят от амплитуды ускорений вынуждающих колебаний. Резонансная частота колебаний уменьшается с ростом амплитуды ускорений вынуждающих колебаний, а коэффициент передачи ускорений для наиболее опасных частот в районе резонанса снижается.

Полученные при помощи микроструктурной модели результаты могут представлять интерес при проектировании реальных виброзащитных устройств на основе сплавов с памятью формы.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 23-21-00167).

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР И ДЕФОРМАЦИЮ В ОБРАЗЦАХ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

К.В. Кудрина, Ф.С. Беляев, А.Е. Волков, Е.А. Вуколов, М.Е. Евард
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
st087502@student.spbu.ru

При проектировании устройств с элементами из сплавов с памятью формы (СПФ), предполагающих высокие скорости деформирования и/или испытывающие циклические нагрузки, в том числе высокочастотные, необходимо учитывать не только уровень рабочих напряжений и температуры, но и скорость деформирования или нагружения, а также возможность изменения температуры образца за счет выделения скрытой теплоты при прямом и поглощения при обратном мартенситных превращениях.

В настоящей работе при помощи критериев Фурье и Био выполнена теоретическая оценка максимального радиуса цилиндрического образца, при котором для заданной скорости деформирования распределение температур в нем можно считать однородным и, соответственно, избежать решения связанной термомеханической задачи для материала, испытывающего мартенситные превращения. При максимальной скорости деформирования $3,3 * 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ он оказался равным 3 мм, при этом число Фурье $Fo = 0,999$. В рамках микроструктурной модели с учетом скрытой теплоты превращения выполнено теоретическое исследование влияния скорости нагружения на деформацию такого образца из СПФ при реализации эффекта псевдупругости и при деформировании в двухфазном состоянии в условиях ньютоновского теплообмена с воздухом. Полученные результаты соответствуют имеющимся экспериментальным данным.

Для пластины из СПФ решена связанная термомеханическая задача и выполнено моделирование растяжения такой пластины с различными скоростями при условии ньютоновского теплообмена на границах. При этом размеры пластины (толщина b мм) выбирали таким образом, чтобы число Фурье для нее было тоже равно $0,999$. Показано, что поведение такой пластины при различных скоростях деформирования аналогично поведению цилиндрического образца. При этом распределение температур по толщине пластины, действительно, однородно: разница между температурами в центре и на поверхности образца не превышает $0,06$ К при деформировании со скоростями $3,3 * 10^{-2} - 3,3 * 10^{-4} \text{ c}^{-1}$. Для пластины толщиной 12 мм ($Fo = 0,14$) эта разница составила 1,5 К при деформировании со скоростью $3,3 * 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ и 1,49 К при деформировании со скоростью $3,3 * 10^{-4} \text{ c}^{-1}$.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 23-21-00167).

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫДЕРЖЕК ВО ВРЕМЕНИ НА РЕЛАКСАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ В УСТРОЙСТВАХ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ CuZnAl.

С.А. Марченко¹, Ф.С. Беляев^{1,2}, А.Е. Волков¹, М.Е. Евард¹, Е.С. Остропики¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт Проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
st087617@student.spbu.ru

Устройства и механизмы на основе сплавов с памятью формы (СПФ), требуют гарантии надежности и стабильности срабатывания после длительного хранения. Для рабочих элементов, особенно для тех, которые используются в космической технике, влияние времени хранения имеет большое значение, поскольку многие устройства могут простаивать в течение многих лет во время полета, но их надлежащее функционирование должно быть обеспечено.

В настоящее время для приложений наиболее часто используются СПФ на основе TiNi. Наряду с ними нашли применение сплавы на медной основе, которые имеют преимущества в электро- и теплопроводности, обладают рядом уникальных функциональных свойств, а также более низкой, по сравнению с никелидом титана, стоимостью. В данной работе выполнено исследование влияния длительных выдержек на релаксацию реактивных напряжений в модельном образце из сплава с памятью формы CuZnAl.

Расчеты выполняли в рамках микроструктурной модели. Предварительно на основании имеющихся рентгеновский данных параметров решёток аустенита и мартенсита были вычислены матрицы тензоров градиента деформации и тензора Грина-Лагранжа для мартенситного превращения $\{L2\}_1-18R$ в сплаве CuZnAl. Полученные матрицы были апробированы при моделировании основных функциональных свойств рассматриваемого СПФ. При моделировании влияния длительных изотермических выдержек во времени на эволюцию реактивных напряжений, полученных в результате нагревания модельного образца в условиях защемления с заданной жесткостью, предполагали, что во времени развивается микропластическая деформация, для которой сформулирован закон аррениусовского типа. Изменение во времени плотности деформационных дефектов происходит в результате микропластической деформации и тероактивированного отжига. Показано, что во времени происходит релаксация реактивных напряжений, скорость которой зависит от начального уровня напряжений. Полученные результаты находятся в хорошем качественном соответствии с имеющимися экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 23-21-00167).

РАСЧЕТ ТЕНЗОРА ВКЛАДА В ДИФФУЗИЮ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОСТИ В ФОРМЕ СУПЕРЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА

Д. М. Пашковский

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
mr.vivivilka@icloud.com

Определение эффективных коэффициентов диффузионной проницаемости для поликристалла является одной из актуальных задач при создании новых материалов с заданными свойствами. В случае материала, имеющего неоднородности эллипсоидальной формы, эффективные диффузионные характеристики определяются аналитически, используя аппарат микромеханики. Однако, для материалов со сложной геометрией микроструктуры возможно только численно моделировать процесс диффузии в репрезентативном объеме. При этом при диффузии в неоднородных материалах необходимо учитывать эффект сегрегации, который заключается в том, что диффундирующее вещество скапливается на границе между матрицей и неоднородностью материала.

Компоненты тензора вклада в диффузионную проницаемость для неоднородности вычисляются на основе найденного поля концентрации и первого закона Фика. Учет сегрегации приводит к разрывности полей концентрации на границах неоднородностей, что является проблемой при решении классическим МКЭ. Поэтому предлагается стационарную задачу диффузии сформулировать в вариационной форме, а решение найти методом Ритца. В работе использован численный метод приближенного решения задачи нахождения функций Ритца при помощи полносвязной сигмоидальной нейронной сети с одним скрытым слоем. Далее на основе полученного поля концентрации вычисляются компоненты тензора вклада в диффузионную проницаемость, который можно затем использовать для расчетов материала с более сложной микроструктурой.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА (ПММА) МАРКИ PLEXIGLAS GS 0Z00

Н.А. Гасратова, И.Д. Шашкин

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
st086920@student.spbu.ru

В современной промышленности набирает популярность применение ПММА в технических системах. Такие изделия зачастую используются при различных погодных условиях: осадках, перепадах температур, воздействии ультрафиолета. Важно понимать, что все это оказывает влияние на качество материала. В работе произведено исследование влияния атмосферных явлений на физико-механические свойства ПММА.

Исследование проведено посредством испытаний материала на растяжение и сжатие. Перед началом испытаний образцы, изготовленные из ПММА марки Plexiglas GS 0Z00, в период с июня по ноябрь 2023 года находились на открытом воздухе и были подвергнуты влиянию различных атмосферных явлений. Образцы были размещены на территории Ленинградской области (г. Гатчина).

Образец для испытаний на сжатие – круговой цилиндр с соотношением высоты к диаметру основания – 2:1. Образец для испытаний на растяжение – универсальная лопатка длиной 230 мм.

Тестирования были проведены на испытательной машине Instron^{*)} при трех различных скоростях деформации: 1, 5 и 10 мм/мин. Были проведены испытания на одноосное сжатие и одноосное растяжение при комнатной температуре по соответствующим ГОСТ. Для сравнения также была проведена вторая серия испытаний для образцов, не проходивших атмосферное воздействие.

На основании полученных экспериментальных данных были сделаны следующие выводы:

- Вычисляемый модуль упругости материала снизился с 3369 МПа до 3136 МПа, что составляет 7%;
- Предел прочности материала на сжатие и растяжение уменьшился на 7-9%. Наиболее это заметно при низких скоростях деформации;
- Произошло охрупчивание материала.

Следовательно, воздействие атмосферных явлений оказывает непосредственное влияние на физико-механические и прочностные свойства данного полимерного материала, что следует учитывать при использовании материала. По итогу работы получены кривые напряжения-деформации материала для дальнейшего применения в расчетах на прочность.

*) Испытания проводились на базе ресурсного центра СПбГУ: «Центр Исследования экстремальных состояний материалов и конструкций».

ИЗУЧЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ YSZ КЕРАМИКИ**П. Манякин¹, Я.В. Конаков², О.Ю. Курапова², И.Ю. Арчаков²**¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия²Институт проблем машиностроения РАН, Санкт-Петербург, Россия
petermaniakin@gmail.com

Керамика из стабилизированного иттрием диоксида циркония (YSZ) является одним из наиболее перспективных материалов, используемых при высоких температурах, например в кислородных газовых сенсорах контроля высокотемпературных технологических процессов (металлургия, стекольное производство); в твердооксидных топливных элементах (SOFC); для изготовления защитных покрытий турбинных лопаток и т.д. Изготовление деталей на основе YSZ с использованием аддитивных технологий является весьма перспективным подходом, однако, для таких процессов необходимо использование специального неорганического связующего, основные требования к такому связующему: работоспособность при высоких температурах и ктр близкий к таковому для YSZ.

Настоящее работа посвящена получению материала на основе кубического диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, с использованием MgO-BaO-B₂O₃ стекла, легированного Co₃O₄, в качестве связующего. Для получения керамики, порошок YSZ с 4 мас.% связующего измельчали в планетарной мельнице, прессовали методом изостатического холодного прессования и подвергали высокотемпературной обработке при 1500 °C в течение 2 часов в печи с хромит-лантановыми нагревателями на воздухе. В качестве прекурсора использовали полученный золь-гель синтезом в варианте обратного соосаждения порошок YSZ со средним размером частиц ~ 300 нм. Структуру керамики исследовали методами СЭМ высокого разрешения, EDS, РФА, плотность материала определяли гидростатическим взвешиванием.

In situ измерение прочности на трехточечный изгиб в интервале 25 -1200 °C показало, что при комнатной температуре предел прочности на изгиб составляет 105±10 МПа. Увеличение температуры вызывает линейное уменьшение значения прочности на изгиб до значений ~ 35 МПа при 1000 °C; в интервале температур более 1000 °C наблюдается резкое уменьшение прочностных свойств. Фрактографические исследования, наряду с изучением структуры и химического состава материала показали, что прочностные свойства материала обусловлены поведением связующего: высокотемпературного стекла.

В результате работы показана возможность использования связующего на основе MgO-BaO-B₂O₃ стекла, легированного Co₃O₄, для существенного расширения температурного интервала эксплуатации керамических материалов типа YSZ – связующее по сравнению с существующими аналогами».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00236, <https://rscf.ru/project/23-19-00236/>.

ГИБРИДНЫЕ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А.Е. Майер, Е.В. Фомин, Н.А. Грачёва, В.В. Погорелко, П.Н. Майер, Б.А. Панченко
Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия
mayer@csu.ru

Методы машинного обучения предоставляют дополнительные возможности при разработке моделей материалов. Отличительной чертой этих методов является формализованный анализ большого количества данных. Искусственные нейронные сети (ИНС) прямого распространения эффективны в задачах классификации и аппроксимации однозначных функций, таких как уравнение состояния, функция, описывающая фазовый переход, порог нуклеации или активации дефектов. В качестве обучающих данных могут использоваться результаты молекулярно-динамического (МД) моделирования или экспериментальные данные. Методы машинного обучения позволяют также обучать (определять параметры) модели материалов, записанные в виде традиционных систем дифференциальных по времени уравнений. Для обучения таких моделей эффективным является статистический анализ обучающих данных на основе алгоритма Байеса. В докладе представлен обзор работ коллектива по разработке гибридных моделей материалов, сочетающих ИНС с подмоделями в виде систем уравнений, обученными методом Байеса.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-11-20153-П,
<https://rscf.ru/project/23-11-45024/>.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ГЦК МЕТАЛЛАХ И ИХ АППРОКСИМАЦИЯ ГЛУБОКИМИ РЕКУРРЕНТНЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ

Е.В. Фомин, А.Е. Майер

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия
fomin33312@gmail.com

При исследовании деформации металлов, можно выделить две стадии: упругая, в которой состояние вещества определяется из текущего значения деформации и температуры, и пластическая, в которой текущее состояние вещества зависит от предыстории деформации. Состояние металла в процессе пластической деформации фактически является динамическим процессом, который с достаточной точностью аппроксимируется специфическими и сложными моделями машинного обучения – рекуррентными нейронными сетями. В данной работе на основе данных молекулярно-динамического моделирования различных траекторий деформации ячейки чистого ГЦК алюминия обучена модель глубокой гибридной нейросетевой модели, включающей как рекуррентные, так и полносвязанные слои.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-11-20153-П, <https://rscf.ru/project/23-11-45024/>.

РАЗРАБОТКА МЕЖАТОМНОГО ПОТЕНЦИАЛА И ТЕНЗОРНОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ Al И Cu НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Б.А. Панченко, А.Е. Майер

Челябинский Государственный Университет, Челябинск, Россия

kajie4@gmail.com

Метод молекулярной динамики (МД) применяется в исследованиях деформации и разрушения металлов. Взаимодействие атомов в рамках МД учитывается с помощью межатомных потенциалов. Чаще всего применяются потенциалы, в которых взаимодействие моделируется аналитическими функциями (EAM, ADP). Другим подходом являются потенциалы машинного обучения, в которых происходит аппроксимация методами машинного обучения данных первопринципного моделирования. Потенциалы машинного обучения обладают точностью, близкой к первопринципным расчетам, при временных затратах, сравнимых с работой аналитических потенциалов. Беллер и Паринелло предложили подход построения параметрического потенциала, в котором потенциал представляет собой искусственную нейронную сеть (ИНС), на вход которой подается информация об атомной структуре, обработанная симметричными функциями-дескрипторами. В нашей работе мы использовали данный подход для разработки межатомных потенциалов Al и Cu.

При моделировании методами механики сплошных сред аналогом межатомного потенциала в некотором смысле является уравнение состояния (УРС). Ранее было предложено обучать ИНС в качестве тензорного уравнения состояния по данным МД моделирования. В данной работе мы используем данные первопринципных расчетов методом теории функционала плотности (DFT) для построения тензорной холодной кривой и данные МД моделирования с потенциалом машинного обучения для оценки теплового вклада.

DFT расчеты осуществлялись программным пакетом Quantum ESPRESSO. Были использованы PBE и PAW функционалы с соответствующими псевдопотенциалами из SSSP. DFT расчеты производились исходя из задачи описания деформированных состояний металла и построения УРС. В каждом вычислении случайно выбирались коэффициенты деформации для всех направлений трансляции элементарной ячейки. Потенциал реализован с помощью программного пакета n2p2, который позволяет применять полученный потенциал для МД расчетов в программном пакете LAMMPS. Средняя относительная ошибка, у потенциала, составила 1–4% для сил и 3–6% для энергий. Результаты DFT расчетов использовались для обучения ИНС тензорной холодной кривой. При МД расчетах были получены состояния с теми же коэффициентами деформации, что при DFT расчетах, но при 10 K с дальнейшим ступенчатым нагревом до 300, 500, 700 и 900 K, а также расчеты при гидростатическом сжатии и растяжении с шагом 0.01 по коэффициенту масштабирования. Неизотропная деформация необходима для проверки того, что тепловой вклад одинаков для всех диагональных напряжений, что позволяет описывать его изотропно. Тепловая добавка представляет собой тепловое давление, зависящее только от температуры и объема.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-11-20153-П, <https://rscf.ru/project/23-11-45024/>.

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАНЮЛИРОВАННОГО ИМПЛАНТАТА ПОСЛЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Ю.Н. Коэмец¹, И.В. Ежов¹, Н.В. Казанцева¹, О.А. Коэмец²

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, y.koemets@imp.uran.ru

В современном мире множество людей ежедневно получают повреждения организма вследствие несчастных случаев или болезней. Одним из путей улучшения качества их жизни является применение различных имплантов. Наиболее распространёнными являются травмы костей таза и позвоночника, на них приходится около 5-15% от всех видов переломов. Для восстановления таких крупных костей применяют канюлированные имплантаты (винты). Потребности медицины в области травматологии требуют применения новых технологий для изготовления имплантатов, а также интенсивных исследований их механических свойств.

В настоящее время титановые сплавы являются наиболее распространённым материалом для изготовления имплантатов для травматологии и ортопедии. Широкое применение титановых сплавов Ti6Al4V и Ti6Al7Nb в медицине связано с высокой усталостной прочностью, коррозионной стойкостью в агрессивных средах организма. Их биосовместимость и показатель модуля упругости материала близки к показателям костных тканей человека. На сегодняшний день остается нерешенной проблема механической прочности, устойчивости к циклическим и экстремальным нагрузкам титановых имплантатов. Известно, что механические свойства значительно изменяются при деформации. При недостаточной механической прочности и высокой нагрузке происходит преждевременное разрушения имплантата до регенерации костной ткани.

В работе проведено исследование структуры, внутренних напряжений и механических свойств (нанотвердости) деформированного канюлированного винта из сплава Ti-6Al-7Nb, после извлечения из кости пациента. Металлографическое исследование было выполнено на растровом микроскопе ZEISS CrossBeam AURIGA с использованием приставки IE 350 X-MAX 80 для энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа. Фазовый состав и внутренние напряжения были определены с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker ADVANCE D8, излучение Cu K α . Механические свойства винта в разных областях (модуль упругости, нанотвердость) были определены с помощью нанотвердомера Nanotest600. Проведено сравнение полученных данных с литературными для установления причины нарушения сроков эксплуатации винта.

Проанализированы закономерности уменьшения β -фазы в зависимости от степени деформации. Установлены механизмы деформации α -фазы после упругой деформации и взаимосвязь структуры и механических свойств как при циклических нагрузках, так и при ударной деформации на изгиб. Определена величина критической упругой остаточной деформации имплантата. Деформация привела к нарушению геометрии формы раньше, чем кость восстановилась (остеоинтеграция имплантата), была нарушена стабильная фиксация, и, как следствие, потребовалось экстренное удаление имплантата.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-01244.

БИОСОВМЕСТИМЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ СЕНСОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ФОСФОРЕСЦЕНТНОГО КЛАСТЕРА МЕДИ(I) И ПОЛИСАХАРИДНЫХ БИОПОЛИМЕРОВ

**И.С. Критченков^{1,2}, А.Х. Критченкова², А.С. Критченков^{1,3}, В.В. Рубаник¹,
В.В. Рубаник (м.л.)¹, Д.И. Семенкова¹, Р.А. Голубев¹**

¹Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

³Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

ilya.kritchenkov@gmail.com

Значение температуры тела, а также ее гомеостаз является критически важным для теплокровных организмов, а отклонение этого параметра от нормы может быть причиной или маркером наличия серьезных патологических процессов.

Во многих случаях задача определения температуры тела решается при помощи тепловизионной техники, однако, как правило, она отличается невысокой (порядка 1-2°C) точностью, а также не может применяться на микроуровне, если речь идет об изучении биологических процессов в клетках.

Одним из альтернативных методов определения температуры является использование термочувствительных люминофоров. На данный момент наиболее применяемыми люминесцентными температурными сенсорами являются органические вещества и комплексы лантаноидов. Наиболее перспективные из опубликованных в литературе соединений имеют чувствительность порядка 3-4% на градус К в диапазоне температур от 32 до 42°C, что меньше, чем у полученных нами композитных фосфоресцентных сенсоров.

Также стоит заметить, что лишь единицы из люминофоров (например, флуоресцеин и индоцианин зеленый) являются доказано биосовместимыми и одобрены к использованию в медицинских целях. Полученные нами композиты содержат в себе только биосовместимые компоненты: ионы меди, тиамазол (одобренное лекарственное средство) и полисахаридные биополимеры.

Нами проведен синтез указанного кластера меди(I) с тиамазолом по модифицированной методике, имеющей преимущество перед опубликованной в оригинальной статье. Оказалось, что этот кластер проявляет интенсивную фосфоресценцию с максимумом полосы эмиссии на длине волны 480 нм. Притом полученные нами данные о проявлении этим кластером люминесцентных и сенсорных свойств являются новыми и ранее не были освещены в литературе. Фотофизические исследования показали, что данное соединение проявляет эффективные сенсорные свойства по отношению к вариациям температуры в физиологическом интервале (от 32 до 42 °C), с чувствительностью порядка 5% на К.

С использованием ультразвукового воздействия получены композиты этого кластера с такими биополимерами, как хитозан, крахмал и пуллулан. Обнаружено, что введение этого люминофора в биополимерную матрицу не сказывается на фотофизических характеристиках: кластер в композите сохраняет эффективную фосфоресценцию и термочувствительность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект № T24Y-004.

Посвящается 300-летию Санкт-Петербургского государственного университета.

РАСЧЕТ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ИМПЛАНТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ**Н.В. Казанцева¹, М.В. Ильных¹, В.П. Кузнецов²**¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия²Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина,

Екатеринбург, Россия

kazantseva-11@mail.ru, maximilynykh@gmail.com

Целью данной работы является исследование влияния дизайна на усталостную долговечность имплантата из стали 316L при воздействии циклической нагрузки. При разработке новых конструкций имплантатов особенно актуальным является вопрос определения их эксплуатационных свойств, в частности статической прочности и усталостной долговечности. Для определения данных свойств требуется наличие специальных испытательных стендов. Изделия медицинского назначения, полученные методами 3D-печати, имеют сложную форму, малые размеры и зачастую не всегда подходят для такого рода испытаний. Более подходящим решением является определение данных свойств, используя методы математического моделирования.

Компьютерное моделирование проводилось с использованием программного продукта ANSYS Mechanical. При расчете напряженно-деформированного состояния имплантата к шестигранной головке имплантата назначено граничное условие FixedSupport (жесткая заделка), приложенная нагрузка составила 30 Н. Расчет эквивалентных напряжений по Мизесу показал, что максимальное значение напряжения 305,3 МПа наблюдается в месте перехода резьбы в упорный фланец шестигранной головки имплантата. Данное значение ниже предела текучести стали 316L. Рассчитанный коэффициент концентрации напряжений составил $\alpha_a = 1,73$, а число циклов до разрушения составило 15 512. Далее величина приложенной нагрузки была увеличена до 40 Н и данная нагрузка была приложена ко всей поверхности имплантата. Расчет эквивалентных напряжений по Мизесу показал, что максимальное значение напряжения составляет 273,3 МПа и наблюдается в том же участке имплантата. Коэффициент концентрации напряжений в данном случае составил $\alpha_a = 1,55$, а число циклов до разрушения составило 63 002. Изменение условий нагружения приводит к уменьшению коэффициента концентрации напряжений и увеличению усталостной долговечности.

На основании полученных данных был рассчитан коэффициент запаса по усталостной прочности, его величина составила $F_s = 1,54$. Для обеспечения консервативного уровня надежности, с бесконечным сроком службы величина данного коэффициента должна составлять не менее 1,5. Таким образом, в нашем случае конструкция имплантата и условия его работы обеспечивают необходимый запас по усталостной прочности на все время процесса остеоинтеграции.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Аддитивность», № 121102900049-1).

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО ПОВЕДЕНИЯ КАНЮЛИРОВАННОГО ВИНТА

А.О. Онищенко, И.В. Ежов, Н.В. Казанцева

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

tolya_onishenko@mail.ru

В настоящее время существует потребность в персонализированных имплантатах в травматологии и ортопедии для оперативного лечения пациентов. Эти имплантаты, созданные с помощью 3D-печати, применяются в различных сценариях, таких как эндопротезирование крупных суставов, включая ревизионное эндопротезирование, замещение обширных дефектов костной ткани и индивидуальные имплантаты для остеосинтеза. Они спроектированы с учетом анатомических особенностей пациента, деформаций костей и требований к биомеханике. В сравнении со стандартными имплантатами, персонализированные имплантаты обладают рядом преимуществ, таких как лучшая оптимизация под анатомию и морфологию повреждения, более удобный и функциональный дизайн, а также гибкая адаптация размеров. Однако, до сих пор остается нерешенной проблема механической прочности и устойчивости имплантатов, полученных с помощью 3D печати, к физиологическим нагрузкам, что вызывает вопросы о их равноценности, по сравнению со стандартными имплантатами, и о возможных путях улучшения их механических свойств.

На сегодняшний день канюлированные винты представляют собой наиболее часто применяемые и широко распространенные ортопедические имплантаты. Они используются как основной метод фиксации при остеосинтезе, входят в состав более сложных конструкций, таких как фиксирующие пластины для остеосинтеза, интрамедуллярные стержни, резьбовые стержни для стабилизации позвоночника, а также в аппаратах внешней фиксации и других устройствах. Винт, как фиксатор, располагаемый перпендикулярно смещающим усилиям при физиологической нагрузке на поврежденный сегмент скелета, в процессе своего функционирования испытывает значительные сгибающие нагрузки. При недостаточной механической прочности материала, из которого изготовлен винт, происходит его преждевременное усталостное разрушение до того, как поврежденная костная ткань успеет регенерировать, что приводит к нарушению стабильности фиксации, вторичному смещению на уровне перелома и впоследствии, неправильному срастанию кости.

В данной работе разработана CAD-модель канюлированного винта. Для оценки усталостного поведения имплантатов в условиях эксплуатации и выявления критических точек в его конструкции проведено имитационное моделирование с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics как для винтов, изготовленных методом лазерной 3D-печати, так и для винтов, изготовленных стандартными методами.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-01244.

ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДсорбЦИИ КИСЛОРОДА НА ПОВЕРХНОСТИ БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-nAg-Cu**В.А. Брызгалов^{1,2}, Е.А. Корзникова^{2,3,4}**¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, Россия²Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия³Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия⁴Академия наук Республики Башкортостан, г. Уфа, Россия

Bryzgalovv2000@gmail.com

Биодеградируемые сплавы на основе цинка привлекли к себе большое внимание в связи с их потенциальным применением в ортопедических имплантатах и сосудистых стентах благодаря своей биосовместимости. Добавление серебра и меди в цинковые сплавы дает дополнительное преимущество - антибактериальные и антимикотические свойства. Однако скорость коррозии этих сплавов зависит от их химического состава, что делает эту тему чрезвычайно важной для биомедицинских исследований. В данной работе были использованы первопринципные вычисления для предсказания влияния добавления легирующих элементов в решетку на структуру биодеградируемого сплава Zn-nAg-Cu и процесс адсорбции. Данный подход был ранее использован для изучения магниевых сплавов, которые также являются одними из наиболее используемых биодеградируемых сплавов. Нами была изучена динамика адсорбции молекул кислорода на различных моделях поверхностей Zn (Zn (100), Zn (110), Zn (111)) с добавлением 1% и 4% серебра (3 и 12 атомов соответственно). Атомы меди не вводились в систему, так как при экспериментальном изучении сплава, медь не была обнаружена на поверхности.

Также была рассчитана адсорбция на интерметаллидной фазе Zn₃Ag, которая находится в экспериментальном расплаве и располагается на границах зерен. Нами была рассчитана энергия поверхности для определения наиболее низкоэнергетической структуры. Все модели имели размер вакуума в 20 Å. Два нижних слоя были зафиксированы для моделирования объемного материала. Все критерии сходимости по силе и энергии сохранялись одинаковыми в ходе вычислений и имели значение 0.0001 эВ/атом и 0.001 эВ/атом соответственно. Энергия отсечки потенциала была равна 520 эВ. Рассмотрены различные геометрические положения молекул кислорода на чистом Zn(100), Zn-1%Ag(100), Zn-4%Ag(100) и интерметаллической фазе Zn₃Ag(110). Самая низкоэнергетическая конфигурация O₂ на поверхностях Zn(100) (E_{ads} = -5,778 эВ), Zn-1%Ag(100) (E_{ads} = -3,457 эВ), Zn-4%Ag(100) (E_{ads} = -3,113 эВ) и Zn₃Ag(110) (E_{ads} = -1,480 эВ). Примечательно, что среди рассмотренных структур чистая поверхность Zn(100) обладает самой низкой энергией адсорбции O₂, а увеличение содержания Ag приводит к уменьшению E_{ads} O₂.

Можно сделать вывод, что включение атомов серебра в решетку повышает коррозионную стойкость за счет химической особенности серебра, которая заключается в его низкой восприимчивости к адсорбентам и потенциальной ковалентной связи в интерметаллической фазе Zn₃Ag.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант РНФ 23-11-00364).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИЗГИБА СЕКТОРАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ

Н.А. Дегтярев

ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
n.a.degtarev@gmail.com

В данной докладе представлено исследование с помощью численно-аналитического метода напряженно - деформированного состояния тонкой однородной изотропной пластины в форме сектора.

Поднимается вопрос об использовании систем компьютерной алгебры (СКА) (computer algebra system, CAS) для расчета секторальных пластин, работающих на изгиб от поперечной нагрузки.

Также демонстрируется эффективность применения одной из таких СКА на примере системы Maple для выполнения расчетов по методу Ритца, а также Бубнова-Галеркина. Выполняется аналитическое преобразование при вычислении интеграла, определяющего функционал полной потенциальной энергии, формирование и решение основной разрешающей системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных числовых коэффициентов в формуле, аппроксимирующей прогиб пластины, визуализация полученного решения.

При решении задачи используется прямой метод решения вариационной задачи о минимизации функционала полной потенциальной энергии деформации тонкой однородной изотропно пластины в форме сектора - метод Ритца и метод Бубнова-Галеркина. Решение строится в форме ряда по базисным функциям. В качестве базисных функций выбираются полиномиальные функции, которые полностью удовлетворяют всем граничным условиям.

Получены приближенные численно-аналитические решения задачи изгиба секторальной пластины в форме четверти круга, защемленной по контуру и испытывающей равномерно распределенные нагрузки.

Продемонстрирована эффективность использования системы аналитических вычислений Maple для решения задачи изгиба секторной пластины методами Ритца и Бубнова-Галеркина.

Алгоритм, описанный в статье, может быть полезен в практической работе для анализа напряженно-деформированного состояния секторальных пластин.

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ЭКВИАТОМНОГО СОСТАВА И УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА КОМПОНЕНТОВ В СПЛАВЕ CoCrFeMnNi НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Е.Г. Астафурова, С.В. Астафуров, Е.В. Мельников, А.В. Лучин, Д.О. Астапов, Д.Ю. Гуртова

ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, Россия
elena.g.astafurova@ispms.ru

С использованием методов электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, механических испытаний на одноосное растяжение выполнено исследование температурной зависимости механических свойств, деформационного поведения и механизмов деформации в сплавах CoCrFeMnNi (сплав Кантора), CoFeMnNi, CoNiCr, Fe₃₅Ni₅Mn₂₀Cr₂₀Co₂₀, Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀. Микроструктуру сплавов исследовали после термомеханических обработок, способствующих гомогенизации сплавов и получению однофазного аустенитного состояния с большим размером зерна (60–200 мкм).

Установлено, что исключение хрома из состава сплава Кантора сопровождается уменьшением прочностных и пластических характеристик во всем исследуемом интервале температур 77–673К (CoCrFeMnNi: $\sigma_{0,2}=180$ МПа, $\delta=60\%$ при 300К и $\sigma_{0,2}=400$ МПа, $\delta=100\%$ при 77К; CoFeMnNi: $\sigma_{0,2}=130$ МПа, $\delta=55\%$ при 300К и $\sigma_{0,2}=260$ МПа, $\delta=60\%$ при 77К). Это обусловлено увеличением энергии дефекта упаковки сплава, изменением характера дислокационного скольжения (изменение типа развивающейся дислокационной структуры от планарной к ячеистой) и подавлением механического двойникования при низкотемпературной деформации. Показано, что сплав CoNiCr обладает самыми высокими прочностными свойствами из выбранной серии материалов, а его пластические характеристики, деформационное упрочнение и механизмы деформации аналогичны сплаву Кантора. Высокие прочностные свойства сплава CoNiCr ($\sigma_{0,2}=260$ МПа, $\delta=70\%$ при 300К и $\sigma_{0,2}=500$ МПа, $\delta=80\%$ при 77К) обусловлены искажением его кристаллической структуры.

Показано, что отклонение состава сплава CoCrFeMnNi от эквивалентной композиции в пользу железа сопровождается увеличением прочностных свойств при сохранении высокой пластичности при пониженных температурах: $\sigma_{0,2}=230$ МПа, $\delta=45\%$ в сплаве Fe₃₅Ni₅Mn₂₀Cr₂₀Co₂₀ при 300К, $\sigma_{0,2}=700$ МПа, $\delta=45\%$ при 77К. Неэквивалентный четырехкомпонентный сплав Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ обладает относительно невысокими прочностными свойствами, но значительной пластичностью ($\sigma_{0,2}=180$ МПа, $\delta=80\%$ при 300К и $\sigma_{0,2}=500$ МПа, $\delta=70\%$ при 77К). Показано, что высокое деформационное упрочнение сплавов Fe₃₅Ni₅Mn₂₀Cr₂₀Co₂₀ и Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ вызвано активацией деформационного $\gamma \rightarrow \epsilon$ мартенситного превращения при температурах деформации ниже комнатной. Деформационный фазовый переход реализуется дополнительно к дислокационному скольжению и двойникованию, обеспечивающим высокое деформационное упрочнение и большие величины удлинения до разрушения в сплаве Кантора при пониженных температурах деформации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00261, <https://rscf.ru/project/20-19-00261/>. Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

МИКРОПОЛЯРНЫЙ КОНТИНУУМ И УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ПОДВИЖНОЙ СРЕДЫ

С.А. Быкова^{1,2}, Е.А. Иванова^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

²Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
sonyabyk5@gmail.com

В данном исследовании проводится обобщение предложенной ранее механической модели электромагнитных процессов на случай движущихся сред.

Мы рассматриваем механическую модель, основанную на континууме Коссера и обладающую как трансляционными, так и вращательными степенями свободы. Используя пространственное описание с подвижной точкой наблюдения, мы формулируем дифференциальные уравнения, описывающие поведение данного континуума. Далее мы сводим эти дифференциальные уравнения к виду, удобному для сравнения с уравнениями Максвелла, и вводим механические аналогии электродинамических величин.

В случае движущихся сред мы используем механические аналогии вектора электрической индукции, вектора магнитной индукции и плотности электрического заряда, которые ранее были введены для случая неподвижных сред. Помимо этого, мы вводим механические аналогии вектора электрического поля, вектора магнитного поля, вектора плотности электрического тока и вектора плотности электрического напряжения, которые обобщают введенные ранее аналогии для неподвижных сред на случай подвижных сред.

Благодаря данным аналогиям в рамках механической модели мы приходим к уравнениям Максвелла для движущихся сред, которые имеют точно такой же вид, как и уравнения Максвелла для неподвижных сред. Это основной результат нашего исследования.

Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-11-00363.

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СИЛУМИНА, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ, НА МЕЗО- И МАКРОУРОВНЯХ

**Е.С. Емельянова¹, А. Бородина^{1,2}, Е.М. Дымнич¹, В.С. Шахиджанов¹,
В.А. Романова¹**

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск,
Россия

emelianova@ispms.ru

Работа посвящена исследованию деформационного рельефа на поверхности алюминиевого сплава AlSi10Mg, изготовленного методом селективного лазерного плавления. В рамках исследования проведен экспериментальный и численный анализ взаимосвязи между структурой и механическими свойствами данного сплава при квазистатическом сжатии. Было проанализировано напряженно-деформированное состояние на уровне зеренной структуры во фрагменте единичного трека, в мезообъеме с несколькими треками и слоями, в макрообъеме с воспроизведением геометрии и расположения треков в слоях макрообразца.

Численный анализ деформации зеренных структур выявил, что приграничные области подвергаются более высоким напряжениям по сравнению с вытянутыми зернами кубической ориентации в центральных областях треков. На боковой поверхности формируется деформационный рельеф, который отражает границы ванн расплава в соответствии с результатами экспериментов. Форма рельефа на поверхности сканирования и боковых сторонах образцов коррелирует с морфологией зерен, выходящих на поверхность.

Расчеты на сжатие моделей макроструктуры также показали, что отдельные треки проявляют себя как уникальные структурные элементы, смещаясь относительно друг друга вследствие интенсивной деформации по границам. Это приводит к формированию выраженного деформационного рельефа на боковых поверхностях, повторяющего границы треков. В большинстве треков приграничные участки подвергаются более интенсивной пластической деформации по сравнению с внутренними областями, что соответствует экспериментальным результатам. Наибольший уровень пластической деформации наблюдается в наклонных участках границ ванн.

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

ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ Al-Mg-Zr В ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБЛАСТИ 77-300 К

Т.С. Орлова¹, Д.И. Садыков^{1,2}, А.М. Мавлютов^{1,3}, М.Ю. Мурашкин¹

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
orlova.t@mail.ioffe.ru

Разработка легких высокопрочных проводниковых алюминиевых сплавов для электротехнических применений является важной задачей современного физического материаловедения. Известно, что измельчение зерен в сплавах до ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния методами интенсивной пластической деформации может значительно увеличить прочность сплавов, однако пластичность при этом часто падает почти до хрупкого состояния.

В настоящей работе представлены результаты исследования по влиянию кручения под высоким давлением (КВД) и дополнительных деформационно-термических обработок на микроструктуру и механические свойства низколегированных УМЗ сплавов Al-Mg-Zr с различной концентрацией Mg в диапазоне (0.5 – 1.2 масс. %) и приблизительно одинаковым содержанием Zr (0.27-0.33 масс.%). Для формирования УМЗ структуры сплавы структурировались методом КВД при давлении $P = 2$ ГПа на $n=10$ оборотов (состояние НРТ). Часть полученных после КВД дисков подвергалась дополнительной деформационно-термической обработке (ДТО), состоящей из низкотемпературного отжига при $T_{AN}=150$ °С (или 230 °С) в течение 1 ч (состояние НРТ+AN(T_{AN})) и небольшой дополнительной деформации (ДД) КВД на $n=0.25$ (состояние НРТ+AN(T_{AN})+0.25НРТ). Показано, что в результате применения ДТО (отжиг при 150 °С и ДД методом КВД на $n=0.25$) все сплавы демонстрируют увеличение пластичности на порядок и более, сохраняя при этом высокий уровень прочности (~80% от прочности в состоянии НРТ). Величина достигнутой пластичности уменьшается, а величина прочности повышается с увеличением концентрации Mg от 0.5 до ~1.2 масс.%. На примере сплава Al-0.95Mg-0.32Zr показано, что в состоянии НРТ+AN+0.25НРТ высокая прочность (предел прочности 370–490 МПа) и хорошая пластичность (7–13%) сохраняются в диапазоне температур 77–293 К, тогда как у образцов в состояниях НРТ и НРТ+AN пластичность во всем температурном интервале очень низкая (<2%). Кроме того, для состояния НРТ+AN+0.25НРТ в температурном интервале 243-293 К впервые обнаружен нетипичный, аномальный характер изменения механических свойств: с понижением температуры прочность уменьшается, а пластичность увеличивается. УМЗ сплав (1.2 масс.%) демонстрирует заметно большую термостойкость по сравнению со сплавами с меньшей концентрацией Mg, что позволяет использовать при реализации ДТО более высокую температуру отжига (230 °С). В результате ДТО с $T_{AN}=230$ °С и ДД методом КВД на $n=0.25$ достигнуто наилучшее сочетание прочности (предел текучести ~380 МПа, предел прочности ~480 МПа) и пластичности (полная пластичность 9%, однородная деформация 4%), которое по прочности не уступает Al-Mg сплавам с содержанием магния ~4% как после традиционной упрочняющей обработки, так и обработки методом РКУП. Физические причины повышения пластичности при сохранении высокой прочности, а также аномального изменения механических свойств в результате применения ДТО анализируются на базе сопоставления изменения параметров микроструктуры и результирующих механических свойств и электропроводности в процессе ДТО.

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку исследования (грант № 22-19-00292).

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ
ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ****А.Н. Кочанов¹, И.Ж. Бунин¹, А.И. Тюрин²**¹Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН,
Москва, Россия²НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовский государственный университет
им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия
kochanov@mail.ru

Обсуждаются некоторые аспекты экспериментального исследования процесса разрушения горных пород (гранита, мрамора, угля, песчаника, антрацита, кварца и др.) на микроструктурном уровне при различных внешних энергетических воздействиях. Рассматриваются возможные механизмы образования и распространения микротрещин при взрывном и электромагнитном импульсном воздействиях на геоматериалы (минералы и горные породы). Эксперименты выполнены с использованием оптической, конфокальной лазерной сканирующей, растровой электронной микроскопии и рентгеновской компьютерной микрофотографии. Установлен эффект образования микротрещин с величиной раскрытия от минимального значения $\sim 0,1$ мкм до нескольких мкм, в то время как длина микротрещин на порядок и более превышала величину их раскрытия. Характерные размеры и концентрация микротрещин зависят от структуры горных пород как природных моно- и полиминеральных агрегатов.

При разрушении горных пород, наряду с образующимися микротрещинами, происходит формирование и эмиссия отдельных минеральных частиц, в том числе субмикронных, размером менее 10 мкм, что характеризует процесс разрушения и является неизменным его атрибутом. Для изучения механизма образования, идентификации и оценки количественных показателей субмикронных частиц использовали метод лазерной спектроскопии размеров частиц в воздушной среде. В результате экспериментов по квазистатическому нагружению (одноосное сжатие) и взрывному воздействию установлено, что для образцов прочных горных пород, независимо от вида воздействия, преобладали частицы размером несколько мкм, а их минимальный размер составил $\sim 0,1$ мкм. Одним из факторов, влияющим на число частиц размером $\sim 0,1$ мкм, является содержание в породе кварца, склонного к хрупкому разрушению. Характерной особенностью распределения числа образующихся в процессе разрушения частиц является наличие максимума в диапазоне размеров от 1,0 до 5,0 мкм.

Методами микро- и наноидентификации в широком диапазоне глубины отпечатка (h от 10 нм до 50 мкм) проведено определение твердости (H), микротвердости (HV), модуля Юнга (E) и вязкости разрушения (K_{IC}) образцов горных пород на различных масштабных уровнях. Для оценки неоднородности механических свойств в геоматериалах построены карты распределения E и H и установлена корреляция размеров, формы и положения границ областей, имеющих постоянные механические свойства, с размерами, формой и положением границ отдельных фаз и включений, видимых на оптических изображениях исследуемых образцов. Проведен термоактивационный анализ и определены активационные и энергетические характеристики процессов локального деформирования материала под индентором.

ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ И ПРИЗНАК ПЕРЕХОДА К КРИТИЧЕСКОМУ («ОПАСНОМУ») СОСТОЯНИЮ МАТЕРИАЛА: МОДЕЛЬ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТ

**Е.Е. Дамаскинская¹, В.Л. Гиляров¹, Д.И. Фролов¹, Ю.С. Кривоносов²,
А.В. Бузмаков²**

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия
Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Обширные экспериментальные данные показывают, что накопление дефектов в гетерогенных материалах, находящегося под действием механической нагрузки, является кинетическим многостадийным процессом. Работа посвящена поиску признаков, позволяющих оценить степень критичности состояния материала и выявить пространственные области объектов (природных или техногенных), в которых процесс разрушения перешел на «опасную» стадию, приводящую к катастрофическому разрушению. Для решения поставленной задачи был применен подход, базирующийся на концепции самоорганизованной критичности.

С использованием модели связанных частиц (BPM – bonded particle model) построена модель разрушения гетерогенного материала, которая помогает детально изучить эволюцию дефектов и сопровождающую их образование акустическую эмиссию. Расчеты методом дискретных элементов (DEM) производились в свободно распространяемом пакете программ MUSEN. Преимущество модельных экспериментов (по сравнению с натурными) состоит в том, что они позволили сопоставить картину эволюции дефектной структуры и параметров событий акустической эмиссии. Анализ вида функции распределения амплитуд акустических событий позволил выявить моменты времени, после которых изменяется характер разрушения.

Проведены лабораторные эксперименты по деформированию образцов различных природных гетерогенных материалов. Особенность экспериментов состоит в том, что два независимых неразрушающих метода - акустическая эмиссия (АЕ) и рентгеновская компьютерная микротомография (СТ) - используются на разных этапах деформирования одного и того же образца. Это позволяет проследить эволюцию дефектной структуры и сопоставить ее с параметрами сигналов АЕ. Показано, что тип функции распределения сигналов АЕ по энергии может использоваться как индикатор текущего состояния деформированного материала и критерий перехода к критическому этапу разрушения. Экспоненциальная функция указывает на не критическое (стабильное) состояние деформированного материала. Степенной вид распределения указывает на то, что процесс накопления дефектов перешел на критическую («опасную») стадию. Полученный результат подтверждается данными рентгеновской томографии на микронном уровне и натурными наблюдениями в условиях действующего горнодобывающего предприятия. Выявленный признак критического состояния может быть использован как физическая основа для нового метода неразрушающего контроля.

О ВЛИЯНИИ ПОРИСТОСТИ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ**Ю.Г. Пронина¹, М.Л. Качанов², М.В. Нарыкова³**¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, РФ²Университет Тафтса, Бостон, США³ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, РФ

y.pronina@spbu.ru

Поля напряжений и деформаций в реальных телах существенно неоднородны, даже если на макроуровне тело находится в однородном напряженно-деформированном состоянии. Степень их неоднородности зависит от микроструктуры материала и рассматриваемого масштабного уровня. В инженерных расчетах, как правило, используются эффективные свойства материалов, связывающие средние по объему физические поля (в нашем случае, напряжения и деформации) в статистически представительном объеме.

Наибольший вклад в изменение эффективных характеристик вносят включения других фаз с максимальным контрастом свойств, в частности – поры и трещины. Для количественного описания распределения пор и трещин в объеме, введено большое число различных параметров: пористость (объемная доля несплошностей или разуплотнение), вектор пористости, тензоры Минковского, линейный и площадной коэффициенты трещиноватости и т.д.; существует несколько понятий плотности трещин. Выбор конкретного параметра концентрации микронесплошностей зависит от того, какие именно свойства материала изучаются в контексте их изменения при изменении концентрации дефектов.

В научной литературе наблюдается тенденция установления зависимостей между изменением эффективного модуля Юнга и пористостью или изменением плотности материала при различных воздействиях. Однако использование пористости как параметра, однозначно определяющего эффективные упругие свойства, имеет ограниченное применение. Некоторые геометрические характеристики порового пространства также оказывают весомое влияние на изменение упругих постоянных. В то же время для трещино-подобных дефектов пористость практически перестает оказывать влияние на упругие свойства и основной характеристикой дефектности материала становится плотность трещин.

В данной работе на нескольких примерах показана возможность извлечения – методами микромеханики – некоторой информации о поровом пространстве и его эволюции по экспериментальным данным об изменении модуля Юнга и плотности материала. Данные взяты из доступных публикаций (для металлов и сплавов, накапливающих поврежденность в процессе ползучести, усталости или наводороживания). Также затрагиваются вопросы применимости «идеализированного» понятия плотности трещин к реальным материалам и возможности ее определения.

**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИН КОЭФФИЦИЕНТОВ ПУАССОНА НА ПРОЦЕСС
РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН****М.Н. Кривошена^{1,2}, Е.В. Туч¹**¹ИФПМ СО РАН, г. Томск, Россия²НИ ТГУ, г. Томск, Россия

marina@ispms.ru

В последнее время экстремальные значения коэффициентов Пуассона привлекают внимание при конструировании новых материалов и, в особенности, анизотропных конструкционных и метаматериалов. Коэффициенты Пуассона не только определяют процесс деформирования материала, но и влияют на процесс распространения упругих волн. Изучение процесса распространения упругих волн в твердых телах необходимо для исследования удара тела о жесткую стенку при создании машин ударного действия, для определения коэффициента восстановления после отделения тела от недеформируемой стенки, для исследования механических характеристик материалов с помощью ультразвуковых методов. Существует немало исследований о том, как геометрия образца материала влияет на процессы распространения в нем упругих волн. При измерениях упругих характеристик материала, учитывают «формфакторы», определяемые геометрией образца, так как, например, в образцах компактной формы и кубической невозможно надежное измерение величин скоростей распространения упругих волн. В большинстве изотропных материалов коэффициенты Пуассона определяются в диапазоне 0.25–0.35. Так как, как правило, коэффициенты Пуассона не измеряют непосредственно в натуральных экспериментах, а определяют через иные упругие характеристики, исследованию влияния этих величин не уделялось должного внимания до возникновения элементов конструкций из аустенитных монокристаллов и применения метаматериалов внутри элементов конструкций для поглощения энергии удара. Немногие материалы характеризуются значениями коэффициентов Пуассона от 0 до 0.25 и от 0.35 до 0.5. Представлены результаты исследования влияния значения коэффициентов Пуассона на процессы изменения кинетической и потенциальной энергии в материале и на изменения границ «формфакторов», в которых невозможно измерение скоростей распространения упругих продольных волн в изотропных и анизотропных материалах. Показано, в какой мере волновые картины деформирования в телах с различными формфакторами из изотропных и аустенитных материалов при ударе о жесткую стенку определяются коэффициентами Пуассона. Показано, что зависящая от коэффициента Пуассона волновая картина деформирования меняет время контакта твердых тел и жесткой стенки при ударе, иногда кратно.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0011

ИССЛЕДОВАНИЕ СЖАТИЯ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**Е.А. Корзникова^{2,3,6}, В.А. Брызгалов^{1,2}, А.С. Семёнов⁴, С.В. Дмитриев⁵**¹Институт проблем сверхпластичности материалов РАН, г. Уфа, Россия²Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия³Академия наук Республики Башкортостан, г. Уфа, Россия⁴Мирнинский политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета, г. Мирный, Россия⁵Институт физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра РАН, г. Уфа, Россия⁶Институт проблем Машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
Elena.a.korznikova@gmail.com

Двумерные материалы, состоящие одного слоя либо из нескольких слабо связанных жестких слоев, представляют интерес в современном материаловедении, поскольку они проявляют новые механизмы деформации при сжатии вдоль слоев. В отличие от трехмерных материалов в них могут большое значение иметь такие механизмы как выход из плоскости и/или изменение углов ковалентных связей. Вклад того или иного механизма зависит как от особенностей самой структуры, так и от скорости деформации. Особенности высокоскоростной деформации таких материалов остается в основном неизученной, в то время как некоторые потенциальные области применения, такие как баллистическая защита или высокочастотное нагружение, диктуют необходимость таких исследований.

Данная работа посвящена моделированию плоских ударных волн, распространяющихся в двумерных материалах, и приводится сравнение со сжатием реализуемым в квазистатических условиях. В исследовании используется декартова система координат, ось X соответствует направлению зигзаг, а ось Y – направлению кресло. В работе рассматривается двумерная нанолента графена с гексагональной структурой. В качестве основного метода исследования был использован метод молекулярной динамики, который ранее зарекомендовал себя как эффективный инструмент анализа различных аспектов изменения структуры различных материалов.

Расчеты показали, что солитонная волна, распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью, инициируется при ударе каждого атома ряда обеих решеток с начальной скоростью $v_0 \sim 4.5$ км/с. В зависимости от энергии инициирующего солитона начального воздействия также меняется скорость распространения и энергия солитона, а также уровень сжатия. В рассматриваемых случаях скорость солитона всегда была больше скорости звука ($v_s \sim 20$ км/с для графена).

В ходе исследования было обнаружено, что затухание ударной волны происходит быстрее для волн, движущихся вдоль направления кресло, по сравнению с направлением зигзаг. Если рассмотреть интенсивность этих колебаний, то видно, что колебания в направлении зигзаг более высокочастотные, чем для направления кресло. Через определенное время регулярная мода разрушается и устанавливаются хаотические фоновые колебания, интенсивность которых для направления кресло значительно выше, чем для направления зигзаг, при этом можно отметить, что хаотические колебания в направлении зигзаг имеют более низкочастотные компоненты, чем в случае кресла, что ассоциируется с меньшими потерями энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант РНФ 23-11-00364).

ОБ ОЦЕНКЕ ТРЕХМЕРНОЙ ПЛОТНОСТИ ТРЕЩИН ПО ИХ СЛЕДАМ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СЕЧЕНИЙ

В.В. Вьяльцева¹, Ю.Г. Пронина¹, М.Л. Качанов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, РФ

²Университет Тафтса, Бостон, США

st076798@student.spbu.ru

Влияние микротрещин на эффективные упругие и проводящие свойства материалов выражается в терминах трехмерной плотности трещин. Через аналогичную величину в матричных композитах выражается и эффект тонких плоских включений (являющихся жесткими в контексте упругих свойств или изоляторами в контексте тепло- или электропроводности). Однако экспериментальная оценка трехмерной плотности трещин сопряжена с большими трудностями, поскольку не может быть выражена через долю свободного объема (разуплотнение), поддающуюся измерению. В данной работе представлена оценка этой величины через двумерную плотность следов трещин/включений, наблюдаемых на поверхностях сечений, которая может быть оценена с помощью обработки микроструктурных фотографий поверхностей (сечений).

В случае статистически равномерного распределения положения микротрещин и их ориентации материал проявляет изотропное поведение, поэтому определение трехмерной плотности трещин возможно по двумерной плотности их следов на любом сечении материала. Полученное, простое в использовании, соотношение подтверждается прямым численным моделированием для статистически равномерного распределения дефектов. Численные эксперименты показали, что осреднение результата по шести граням одного образца со случайным распределением трещин обеспечивает достаточную точность даже в случаях, когда в поле наблюдения попадает относительно небольшое количество дефектов.

В случае наведенной геометрической анизотропии, когда ориентация трещин имеет предпочтительное направление, задача усложняется, так как плотности трещин в таком случае становятся тензорными величинами. И встает вопрос не только о количественной связи между тензором трехмерной плотности трещин и тензорами двумерных плотностей их следов на сечениях с различной ориентацией, но и, в принципе, о существовании таких взаимно-однозначных соотношений. В отдельных случаях такие соотношения можно установить.

Такие соотношения могут позволить проводить мониторинг эффективных упругих и проводящих свойств материалов в процессе развития повреждаемости с помощью обработки изображений их поверхностей (при известных свойствах исходной матрицы). До настоящего времени подобные оценки были сделаны только для материалов, чьи эффективные характеристики определяются объемной долей дефектов (которая поддается измерению стандартными методами). Обработка изображений поверхности поврежденных образцов в некоторых случаях может производиться методами неразрушающего контроля. Результаты могут применяться для металлов и сплавов, керамик, горных пород (с макротрещинами) и многих других материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-19-00100), <https://rscf.ru/project/21-19-00100/>.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТА СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Н.С. Селютина

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
nina.selutina@gmail.com

Дается развитие ранее предложенной модели, явно учитывающей релаксационные процессы, для прогнозирования стабильных режимов циклического деформирования. Прогнозирование эффекта стабилизации пластической деформации сталей, а также сравнение монотонного и циклического деформирования стали Х65, проводится на основе предлагаемой модели, модели Мазинга и модели Master curve. Дается обзор моделей упругой и неупругой приспособляемости. Показано, что предлагаемая модель одновременно прогнозирует режимы упругой и неупругой приспособляемости для различных материалов в отличие от существующих моделей.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 23-71-01059).

ДИНАМИЧЕСКОЕ И УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Д.Д. Хайретдинова, Н.С. Селюткина

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
Dkhay1810@gmail.com

В работе рассматриваются результаты по динамическому и статическому разрушению многослойных композитов на основе предлагаемой релаксационной модели необратимого деформирования и разрушения. На примере деформирования ламинатов показано, что учет процессов релаксации каждого слоя в рамках единой модели позволяет прогнозировать многостадийное деформирование металлического композита при статических и динамических нагрузках. Также рассматривается усталостное разрушение ламинатов и предлагается новая модель усталостного разрушения в виде кинетического уравнения Качанова-Работнова.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 23-71-01059).

ВЛИЯНИЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПО МЕТОДУ ТЕЙЛОРА НА ПОВЕДЕНИЕ КРУПНОЗЕРНИСТОЙ И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МЕДИ **Р.В. Лукашов¹, С.А. Атрошенко^{1,2}, Г.А. Волков¹, Е.С. Остропики¹, А.А. Груздков^{1,3}**

¹СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

²ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия
satroshe@mail.ru

Один из простейших способов испытания материалов при ударном нагружении - метод прямого удара цилиндрического образца о жесткую преграду (метод Тейлора). В процессе деформирования образца пластический фронт движется от места контакта до некоторого сечения, определяемого скоростью удара. В ходе испытания фиксируется только скорость соударения образца с преградой. Помимо этого, проводится прямое измерение длины образца и диаметр крайнего сечения до и после взаимодействия с преградой, а также длины участка, на котором деформирование было только упругим. Обработка получаемых результатов по классической методике, позволяет оценить только величину так называемого динамического предела текучести. Однако, эксперименты показывают, что эта величина не является постоянной и существенно зависит от скорости нагружения. Поэтому цель исследования заключалась в создании модифицированной методики обработки результатов измерений, с целью вычисления значений прочностных параметров, определяющих скоростную зависимость предела текучести материала. Была отлажена и систематизирована методика проведения экспериментального исследования, решена проблема контроля условий проведения испытания, а также точности измерения необходимых величин, а именно скорости столкновения образца, и параметров его остаточной формы после удара. Также, на основе критерия инкубационного времени была разработана новая методика обработки данных испытаний по схеме Тейлора. Показано, что результаты обработки, полученные в рамках предлагаемого метода, позволяют обнаружить явную зависимость характеристик материала, определяющих его прочностные свойства, при высокоскоростном динамическом нагружении. Сравнительные испытания медных образцов с крупнозернистой (КЗ) и ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой показали, что используемый тип обработки не ухудшает его прочностные свойства при ударном деформировании.

В работе проводилось металлографическое исследование образцов из меди М1 в КЗ и УМЗ состоянии, полученном равноканальным угловым прессованием, из прутков одной партии после динамических испытаний тестом Тейлора. Увеличение скорости деформации ультрамелкозернистых образцов приводит к уменьшению количества двойников и почти полному их отсутствию и уменьшению их размера в противовес крупнозернистой меди, в которой повышение скорости нагружения вызывает увеличение количества двойников и уменьшение их размера.

Работа выполнена в рамках проекта «Динамика и экстремальные характеристики перспективных наноструктурированных материалов» (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-1114) и по грантам РФФИ № 22-11-00091 и РФФИ № 23-79-10118. Авторы благодарят Николаева М.М., ученика 8 класса авторской школы «Горный» за помощь в подготовке и исследовании структуры образцов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКО-ГИПЕРУПРУГИХ КОНСТАНТ МАТЕРИАЛА ПО ДАНЫМ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Д.А. Бояршинов^{1,2}, О.Ю. Сметанников²

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,

Россия

houston707@mail.ru

В условиях быстроразвивающейся приборостроительной отрасли повышаются требования к динамическим характеристикам проектируемых устройств. Вибрационная нагрузка является одним из основных типов воздействий, которые определяют требования к динамическим параметрам приборов. Для обеспечения работы устройств в условиях вибрации могут быть поставлены ограничения на максимальные амплитуды угловых и линейных ускорений, значения резонансных частот или требования другого типа. Для их удовлетворения в самых чувствительных местах часто используются системы амортизации, позволяющие существенно снизить уровень колебаний за счет рассеивания энергии. Современные подходы в проектировании данных систем требуют разработки численных моделей их динамического поведения в условиях вибрационного воздействия. Большие упругие деформации и скорости деформирования полимерных частей систем амортизации создают необходимость применения вязко-гиперупругих моделей поведения материала. Это делает актуальной задачу построения методики идентификации гиперупругих и вязкоупругих материальных свойств.

Для определения материальных констант было получено полуаналитическое решение задачи вязко-гиперупругого циклического деформирования в условиях одноосного напряженного состояния (ОНС) и одноосного деформированного состояния (ОДС). Данные соотношения были построены при использовании потенциала энергии деформации Муни-Ривлина с двумя константами с учетом сжимаемости при описании гиперупругого поведения и рядов Прони для описания вязкоупругой части с принятием гипотезы постоянства модуля объемного сжатия. В качестве экспериментальных данных были использованы данные циклических испытаний полимерных образцов цилиндров и лопаток в условиях ОНС и ОДС, проведенные ИМСС УрО РАН и ПНИПУ. Идентификация материальных свойств производилась путем минимизации разницы между полуаналитическим решением с подобранными константами и экспериментальными данными с помощью метода Нелдера-Мида.

Полуаналитические кривые деформирования материала, построенные с подобранными материальными свойствами, достаточно точно описывают экспериментальные кривые. Приведенная методика вычисления вязко-гиперупругих свойств материала на основе результатов натуральных циклических экспериментов позволит в дальнейшем построить модель динамического поведения системы амортизации для определения влияния дефектов и поиска рациональных решений в проектировании данных систем.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С РАЗЛИЧНЫМ РАЗМЕРОМ ЗЕРЕН

М.Н. Антонова¹, Ю.В. Петров^{1,2}

¹Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
maliya.antonova@gmail.com

Рассматривается результат применения комбинации модифицированной релаксационной модели пластичности на основе интегрального критерия текучести с энергетическим критерием упругопластического разрушения для оценки предельных прочностных характеристик магниевых сплавов Mg–0,3Ca (мас.%) и Mg–1,0Al– 1,0Ca–0,4Mn (мас.%) с различными размерами зерен, подвергающихся относительно низким скоростям нагружения до момента разрушения образцов. Отмечается, что размер зерна материала может привести к нестабильности диаграмм деформирования наряду со скоростью деформации и температурой, что может повлиять на изменение величины инкубационного времени: для крупного размера зерна не наблюдается явления зуба текучести, которое характеризуется отчетливым падением напряжения на начальной стадии пластической деформации, тогда как разница между верхним и нижним пределом текучести увеличивается с уменьшением размера зерна. Также была выявлена заметная тенденция к увеличению инкубационного времени по мере уменьшения размера зерна для указанных магниевых сплавов.

Модифицированная релаксационная модель пластичности позволяет хорошо описывать и прогнозировать деформацию магниевых сплавов, в данной работе эта модель дополнена энергетическим условием, позволяющим определять критическую деформацию, при которой происходит разрушение материала. Для определения критических характеристик упругопластического разрушения вводится в рассмотрение критерий критической величины упругой энергии деформации.

Определение величины инкубационного времени по данным экспериментов позволяет не только спрогнозировать поведение материала при различных режимах нагружения даже в случае немонотонности его кривой деформирования, но и понять, какая структура материала является оптимальной для тех или иных целей эксплуатации, а комбинация модели релаксационной пластичности со сформулированным критерием упругопластического разрушения позволяет предсказать и момент, до которого образец будет деформироваться без разрушения и в случае развитой пластической деформации.

Исследование выполнено при поддержке мегагранта № 075-15-2022-1114.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНОВ С РАЗЛИЧНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Р.В. Лукашов¹, Г.А. Волков^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
st069218@student.spbu.ru

Актуальным вопросом в механике разрушения является прогнозирование потенциальной несущей способности, которой может обладать материал под действием определенной нагрузки, в том числе динамической. Это востребовано, как и при аналитических оценках, так и при конечно-элементных расчетах.

В основе моделирования кривых прочности материалов при одноосном нагружении был использован критерий инкубационного времени. Оптимальные параметры критерия, характеризующие процесс разрушения материалов, оценивались методом знако-возмущенных сумм.

Один из параметров, критическое напряжение, по логике критерия должен соответствовать статической прочности материала. Таким образом, возникает возможность сравнить значение этого параметра, предсказанное по данным из динамического диапазона скоростей деформации, с измеренным традиционным способом при медленном нагружении.

Существенное отличие этих величин может указывать на смену характера разрушения образцов в проанализированных испытаниях.

Анализ различных экспериментальных данных показал, что увеличение доли более прочного наполнителя в смеси приводит к тому, что оценка критического напряжения становится выше значения, измеренного при медленном нагружении, в то время как увеличение доли резиновых частиц занижает эту оценку. Более того выяснилось, что эффект обоих наполнителей может определённым образом сочетаться: для бетонов и с гранитной, и с резиновой крошкой оптимальный параметр был сначала выше статической прочности, а с увеличением процента резины в смеси он начал снижаться.

Полученные данные согласуются с экспериментальными наблюдениями. Многие исследователи отмечают, что в бетонах при статическом разрушении трещины распространяются преимущественно по межфазной зоне и цементному камню, а в динамических испытаниях растет доля трещин, проходящих по крупным гранитным камням.

ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И УПРУГАЯ ЭНЕРГИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В УПРУГОМ ШАРЕ

Д.А. Петров¹, М.Ю. Гуткин¹⁻³, А.Л. Колесникова^{1,3}, А.Е. Романов³

¹Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

petrov_d_a@ipme.ru

В связи с бурным развитием технологий синтеза композитных наночастиц особую ценность в последние годы приобретает теоретическое исследование образования и поведения в них различных дефектов, в частности, краевых дислокаций. Появление дислокаций в таких композитных системах, с одной стороны, во многом обусловлено упругими полями решеточного несоответствия между материалами, составляющими эти наночастицы. С другой стороны, дислокации вызывают деградацию различных функциональных свойств подобных низкоразмерных наноструктур. Поэтому теоретические модели, описывающие механизмы образования и развития дислокаций в таких объектах, вызывают большой интерес. Первым шагом в построении подобных моделей должно быть исследование упругих полей и энергий дислокаций с учетом граничных условий на внешних и внутренних границах наночастиц.

В данной работе представлено аналитическое решение граничной задачи теории упругости о прямолинейной краевой дислокации, проходящей через центр упруго-изотропного шара со свободной поверхностью. Здесь использован традиционный подход, когда искомое решение ищется в виде суммы двух слагаемых – хорошо известного решения для краевой дислокации в бесконечной среде и дополнительного упругого поля, которое обеспечивает выполнение граничных условий на свободной поверхности шара. Нахождение второй части осуществлялось с помощью общего решения Лурье второй граничной задачи теории упругости для шара.

Полученные результаты представлены в виде аналитических формул и построенных с их помощью карт напряжений в различных сечениях шара. Анализ этих карт показал, что напряжения дислокации в шаре существенно отличаются от случая бесконечной среды. Их сравнение с другими известными решениями позволило выделить несколько качественных особенностей. Во-первых, вблизи точек пересечения поверхности шара с линией дислокации (вблизи полюсов шара) характер решения ожидаемо похож на таковой для случая краевой дислокации, линия которой перпендикулярна свободной поверхности полубесконечной среды. Во-вторых, в экваториальном сечении карты напряжений практически неотличимы от таковых в случае краевой дислокации, расположенной на оси бесконечного круглого цилиндра. При этом, однако, осевые напряжения существенно меньше в случае шара.

С помощью найденного решения получено также аналитическое выражение для упругой энергии дислокации в шаре. В пересчете на единицу длины линии дислокации упругая энергия оказалась меньше, чем в случае цилиндра, на величину порядка энергии ядра дислокации. Эта разница существенна для низкоразмерных систем.

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Л.А. Игушева

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
igusheva15@gmail.com

Известные экспериментальные данные по изучению влияния температурной обработки на динамическое разрушение горных пород анализируются с использованием критерия инкубационного времени разрушения. Получены зависимости прочностных характеристик (прочности на сжатие и трещиностойкости) от скорости нагружения предварительно термически обработанных образцов песчаника и гранита.

Оценено влияние предварительной термической обработки на динамическую прочность на сжатие песчаника, вычислены значения инкубационного времени для каждой температуры предварительной обработки. С ростом скорости внешнего воздействия происходит увеличение прочностных характеристик песчаника для всех значений температуры. Исследовано изменение динамической трещиностойкости гранита в результате действия температурной обработки. На основе известных экспериментальных результатов построены скоростные зависимости вязкости разрушения гранита, предварительно обработанного при различных температурах. Показано, что при увеличении скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений наблюдается увеличение вязкости разрушения для всех значений температуры. С ростом температуры динамическая вязкость гранита разрушения уменьшается, а значение инкубационного времени увеличивается.

Обсуждаются эффекты инверсии прочности на сжатие песчаника и инверсии трещиностойкости гранита, состоящие в том, что при сравнении двух образцов материала, обработанных при различных температурах, один образец обладает более высокой прочностью на сжатие (трещиностойкостью) при квазистатических нагрузках, однако легче разрушается при высокоскоростных воздействиях по сравнению со вторым образцом. Показано, что для описания динамического разрушения материала с учетом влияния температурной обработки достаточно двух констант материала: инкубационного времени и статического предела прочности (вязкости разрушения).

Автор выражает благодарность научному руководителю член-корреспонденту РАН, доктору физ.-мат. наук Петрову Юрию Викторовичу и Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2022-1114 от 30 июня 2022 г.).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ НАРАСТАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

В.А. Морозов, Ю.В. Петров, В.М. Кац, А.Б. Яковлев, В.С. Иванов, П.С. Платонов
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
st048035@student.spbu.ru

В работе исследовали зависимость значения пробойного напряжения от времени его нарастания электрофизическими методами нагружения. Данное исследование представляет научную и практическую значимость ввиду развития подтверждаемых богатым экспериментальным материалом представлений об инерционном характере процессов потери структурной целостности материалов при высокоинтенсивном введении энергии в сплошную среду.

Целью данной работы являлась разработка и апробация линейки методов исследования электрической прочности пленочных полимерных диэлектриков на примере пленок хитозана толщиной 40 мкм и установление фактической зависимости электрической прочности выбранного материала в широком диапазоне скоростей нарастания напряжения от статического до наносекундного диапазона. Новый исследуемый материал выбран ввиду его использования в медицинской практике.

На основе генератора коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-300 был разработан и апробирован ряд установок, на шести из которых удалось получить данные, позволившие построить зависимость электропрочности исследуемой пленки от времени пробоя в диапазоне изменения напряжения пробоя от 1 кВ до 55 кВ, а времени пробоя – от долей секунды до единиц наносекунд.

Результаты экспериментов показали, что динамическая электропрочность пленки в исследованном диапазоне превышает статическую в 55 раз.

Работа выполнена при поддержке проекта «Динамика и экстремальные характеристики перспективных наноструктурированных материалов» (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-1114).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ОБЛАСТЕЙ НОВОЙ ФАЗЫ В ТЕЛЕ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

П.К. Кабанова, А.Б. Фрейдлин

Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
kabanovapk@mail.ru

Рассмотрена связанная задача эволюции областей новой фазы в результате фазового превращения в теле с концентраторами напряжений в виде кругового и эллиптического отверстий. Фазовое превращение сопровождается изменением модулей упругости и собственной деформацией превращения. Для описания кинетики межфазной границы используется подход механики конфигурационных сил. Распространение межфазной границы определяется кинетическим уравнением, связывающим скорость межфазной границы с конфигурационной силой, равной скачку нормальной компоненты тензора напряжений Эшелби.

Разработана и верифицирована численная процедура для моделирования эволюции области новой фазы в упругом теле. Решение задачи о напряженно-деформированном состоянии двухфазного тела основано на методе конечных элементов.

Рассмотрены различные сценарии эволюции области новой фазы в однородном теле в зависимости от внешней деформации. Показано, что область новой фазы сама может выступать в качестве концентратора напряжений, который способствует дальнейшему фазовому превращению.

В результате анализа распределения конфигурационной силы на межфазной границе в теле с концентратором напряжений продемонстрированы различные варианты распространения межфазной границы в зависимости от расстояния между межфазной границей и концентратором напряжений, а также в зависимости от формы концентратора. Показано, как эллиптическое отверстие может инициировать рост области новой фазы даже при малых внешних деформациях, при которых фазовый переход в однородном теле не происходит.

Исследовано, как форма и степень локализации области новой фазы вблизи вершины эллиптического отверстия, являющейся прообразом процесс-зоны вблизи вершины трещины, зависят от параметров материалов фаз. На основании анализа распределений напряжений в теле показано, как рост области новой фазы вызывает релаксацию напряжений.

Изучены распределения конфигурационной силы вдоль межфазной границы и продемонстрировано, что эти распределения могут быть инструментом для предсказания особенностей развития области новой фазы.

Разработанные и верифицированные алгоритмы и проведенное численное моделирование могут служить основой для последующего моделирования и исследования совместного распространения трещины и области новой фазы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В ВЯЗКОУПРУГОМ ТЕЛЕ

А.Б. Иванова^{1,2}, А.Б. Фрейдлин¹

¹Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург
alezandraivanova@mail.ru

Разработка и проектирование современной техники требует учета влияния совместного воздействия термомеханических, физических и химических полей. Точное формулирование и решение таких связанных задач дополнительно мотивируется микро- и наноразмерной природой электронных и мехатронных устройств, как, например, в случае окисления и разрушения кремниевых частей МЭМС. Другим важным примером являются процессы, происходящие в литий-ионных батареях, поскольку в этом случае пренебрежение влиянием напряжения на кинетику химических реакций, а также влиянием самих реакций на возникновение внутренних напряжений может привести к неисправности батареи. Вышеупомянутые химические реакции окисления и литизации кремния сопровождаются изменением реологических свойств материала и большой собственной деформацией превращения, которая вызывает появление внутренних напряжений. Рассматривается случай реакций, локализованных на фронте реакции. Скорость фронта зависит от концентрации диффундирующего компонента и напряжений, которые, в свою очередь, зависят от положения фронта. Кроме того, в случае вязкого продукта реакции на текущее напряженно-деформированное состояние и скорость фронта может влиять история распространения фронта, что приводит к полной взаимосвязи между напряжениями, диффузией и реакцией.

На основе концепции тензора химического сродства рассматривается распространение фронта химической реакции во взаимосвязи с напряжениями в деформируемом твердом теле в одномерной постановке для стержня и в случае плоского фронта реакции в пластине. Ставятся и решаются задачи в случае заданных перемещений или заданных напряжений для упругого и вязкоупругого продуктов реакции. Исследуется зависимость напряжений и деформаций от положения фронта. Изучается влияние параметров материала на релаксацию напряжений при распространении фронта. Демонстрируется возможность блокировки распространения фронта. Рассматриваются случаи постоянной и циклической деформации. Полученные результаты и разработанные сценарии рассмотрения задачи предполагается использовать при дальнейших исследованиях связанных задач хемомеханики и дальнейшем развитии концепции тензора химического сродства.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема №124041500009-8).

ОБ УЧЁТЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МОДЕЛЯХ НЕРАВНОВЕСНОЙ ВЯЗКОСТИ**У.П. Карасева, А.Б. Фрейдин**

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

u.p.karaseva@gmail.com

Применение моделей с изменяющимся коэффициентом вязкости представляет собой актуальный способ моделирования поведения материалов. Иногда в анализах применяется прямая зависимость вязкости от времени, но более точно она должна определяться через зависимость вязкости от напряжений и/или релаксирующих параметров структуры. Так, вязкость диоксида кремния и литизированного кремния, которые возникают соответственно в процессе окисления кремния и в литий-ионных аккумуляторах, зависит от напряжений. Это приводит к формированию новых материалов и изменению их реологических свойств. Релаксирующие напряжения при этом могут влиять на вязкость через инварианты тензора напряжений или комбинации инвариантов. В то же время изменение вязкости стеклообразных материалов обусловлено неравновесностью микроструктуры, которая, стремясь к равновесию, изменяет вязкость. В таких случаях вязкое течение материалов можно описать с помощью моделей с переменным коэффициентом вязкости, зависящим от фиктивной температуры, отражающей степень неравновесности структуры.

Релаксационные процессы также играют важную роль для различных высокотехнологических применений стекла. Например, характеристики стекла для жидкокристаллических дисплеев определяются объемной релаксацией, то есть уплотнением. Это особенно важно для высокопроизводительных дисплеев, где малый размер пикселей приводит к ужесточению требований к уплотнению стекла во избежание смещения пикселей. Одним из широко используемых методов упрочнения стекол является ионный обмен, при котором вследствие обмена ионами в приповерхностных слоях стекла и внедрения ионов большего размера возникают сжимающие напряжения. Однако возникающие напряжения релаксируют, в связи с чем для применения упрочненных стекол важно знать реальные значения остаточных напряжений. Температура ионного обмена оказывается существенно ограниченной релаксацией возникающих напряжений.

К настоящему времени хорошо изучены модели вязкости, зависящей от фиктивной температуры, проведен их сравнительный анализ. Также имеются модели нелинейной вязкости, зависящей от напряжений. Однако до сих пор не было исследований, учитывающих одновременное воздействие напряжений и фиктивной температуры на релаксацию напряжений и вязкость. В связи с этим в работе проведен анализ модели с изменяющимся коэффициентом вязкости с учетом обоих процессов релаксации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8).

НАЧАЛЬНО-КРАЕВАЯ ЗАДАЧА МЕХАНОХИМИИ В УПРУГОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ.

И.А. Рублев, А.Б. Фрейдлин

Институт Проблем Машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
ilya_rublev@mail.ru

Исследуется задача распространения осесимметричного плоского фронта химической реакции в упругом цилиндрическом теле. Реакция локализована на фронте радиуса R_f и поддерживается диффузией вещества B_* через область, занятую превращенным материалом B_+ . Диффундирующий компонент реакции проникает в область с превращенным материалом через внешнюю поверхность тела радиуса R и полностью поглощается химической реакцией на ее фронте R_f .

Превращение происходит в два этапа. Первый этап – этап накопления диффундирующего компонента B_* в исходном материале B_- . Моменту отщепления фронта химической реакции от границы тела соответствует достижение концентрацией на границе критического значения, равного равновесной концентрации c_{eq} , которая зависит от напряжений, порождаемых деформацией превращения и внешней нагрузкой, и соответствующей нулевому значению нормальной компоненты тензора сродства. Второй этап – распространение фронта реакции, поддерживаемое диффузией B_* через превращенный материал.

Для описания влияния напряжений на кинетику фронта используется концепция тензора химического сродства. Задача является связанной: напряжения влияют на скорость фронта реакции, а движение фронта, сопровождающееся собственными деформациями превращения, приводит к возникновению механических напряжений, которые в свою очередь зависят от положения фронта.

В результате решения была исследована зависимость времени начала реакции от параметров диффузии, константы скорости реакции, собственной деформации превращения, модулей упругости компонентов реакции и внешней деформации.

На этапе распространения фронта реакции была получена скорость фронта в зависимости от его положения для разных вкладов химических энергий в реакцию. Для полученных скоростей фронта реакции была исследована конкуренция между механическим и химическим вкладами энергий. Было проведено сравнение полученного решения с решением задачи в постановке квазистационарной диффузии. Выявлено, что учет нестационарности особенно сильно влияет на начальный этап продвижения фронта. По окончании переходного процесса решение выходит на стационарный режим.

Также были определены концентрации диффундирующего компонента на фронте реакции по мере его продвижения по телу при различных вкладах химических энергий γ , которые были сопоставлены с решением задачи в квазистационарной постановке. Во всех случаях на начальном (переходном) этапе наблюдается сильное расхождение в постановках квазистационарной и нестационарной диффузии.

Было исследовано влияние параметров диффузии и константы скорости реакции на решение нестационарной задачи.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН.

УПРУГАЯ ЗАДАЧА О КВАНТОВОМ КОЛЬЦЕ ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОСТРАНСТВА

И.А. Ковалев¹, А.Л. Колесникова^{2,3}, М.Ю. Гуткин¹⁻³

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
i.kovalev2001@yandex.ru

Многие современные электронные и оптоэлектронные устройства базируются на плоских гетероструктурах с квантовыми точками. Квантовые точки могут быть различной формы, например, в виде цилиндра с отверстием – кольца. Исследования устойчивости гетероструктур с квантовыми кольцами (КК) к образованию в них дислокаций и других дефектов, приводящих к деградации рабочих характеристик гетероструктуры в целом, чрезвычайно важны и актуальны.

В основе определения оптимальных параметров КК, не приводящих к локальной пластической деформации вблизи нее, лежит упругая задача о дилатационном цилиндрическом включении с продольным отверстием в полупространстве.

Такое включение обладает собственной деформацией вида:

$$\varepsilon_{ii}^* = \varepsilon^* \delta(V_0), \quad i = x, y, z \text{ и } \rho, \varphi, z, \quad (1)$$

где $\delta(V_0) = \{1, \mathbf{r} \in V \vee 0, \mathbf{r} \notin V_0\}$; V_0 – область, которую занимает полый цилиндр.

На свободной поверхности полупространства ($z=0$) заданы граничные условия:

$$\sigma_{kz}|_{z=0} = 0, \quad k = \rho, \varphi, z, \quad (2)$$

В рамках выбранной модели упругое поле КК представляет собой суперпозицию поля сплошного цилиндра и соосного ему цилиндра меньшего радиуса, величина собственной деформации которого противоположна по знаку. Поэтому граничная задача решалась для сплошного включения.

При наличии условий (2) поле сплошного включения было представлено в виде суммы полей включения в бесконечной среде, зеркального включения и непрерывно распределенных по поверхности полупространства петлевых радиальных дислокаций Соммианы. В результате такого приема и с учетом того, что $\sigma_{\varphi z} \equiv 0$ для цилиндрического включения и петель, условия (2) выродились в одно интегральное уравнение Фредгольма I рода относительно неизвестной функции распределения петель Соммианы, которое решалось с помощью пары интегральных преобразований Ханкеля.

На основе полученных решений в виде интегралов Лифшица-Ханкеля с помощью программного пакета Wolfram Mathematica были численно построены карты полей напряжений в центральном продольном сечении сплошного включения и КК.

Исходя из расчета поля напряжений КК с собственной деформацией (1) в упругом полупространстве показано, что такое КК создает в окружающей матрице ненулевое гидростатическое напряжение в отличие от модели КК в бесконечной среде. Это приводит, во-первых, к упругому взаимодействию КК с другими дилатационными дефектами (например, с точечными) и, во-вторых, к уменьшению упругой энергии КК вблизи свободной поверхности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА ПЛАСТИН С ГРАДИЕНТОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

М.М. Пегливанова

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, РФ
st067846@student.spbu.ru

Современный уровень развития различных отраслей промышленности требует улучшения комплекса механических свойств толстолистового проката. Одной из перспективных технологий улучшения свойств сталей является специальная температурная обработка листового проката (разработанная Максимовым А. Б. и его коллегами), которая заключается в одностороннем ускоренном охлаждении стали из аустенитной области, и приводящая к градиенту прочностных свойств по толщине проката. При этом в металле создаются макрообласти заданной топологии и микроструктуры отличной от матричной. Во многих металлах и сплавах также можно наблюдать SD-эффект, то есть разницу между пределами текучести при растяжении и сжатии.

В рамках данной работы рассматривается задача о чистом изгибе прямоугольной пластины с градиентом пластичности и SD-эффектом. Для примера рассматривается пластина из толстолистовой судовой стали толщиной 10 и 14 мм. Для определения градиента пластичности используются экспериментальные данные Максимова А. Б. и соавторов, о распределении твердости по толщине листа (так как между пределом текучести и пределом прочности существует корреляционная зависимость).

Задача решается с применением стандартных положений технической теории изгиба пластин в предположении идеального упруго-пластического поведения материала.

В рамках данной постановки, задача разбивается на 4 стадии:

- (1) стадия упругого изгиба;
- (2) стадия упруго-пластического изгиба, когда предел текучести достигнут только на одной стороне пластины;
- (3) стадия упруго-пластического изгиба, когда предел текучести достигнут на обеих поверхностях пластины;
- (4) предельное состояние, когда пластина полностью перешла в пластическое состояние;

При упруго-пластическом изгибе пластины, обладающей такими свойствами, происходит смещение ее нейтральной плоскости, которое обусловлено двумя факторами: эффектом разнопрочности и градиентом прочностных свойств. Важно отметить, что эти смещения могут как накладываться друг на друга, усиливая эффект (в случае, если градиент направлен в сторону сжатых волокон), так и наоборот.

Для сопоставления результатов задача решалась как численно-аналитическими методами, так и с помощью конечно-элементного пакета.

Исследовано влияние различных параметров на напряженно-деформирование состояние пластины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-19-00100), <https://rscf.ru/project/21-19-00100/>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕГРАД ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

А.В. Кануткин¹, П.А. Радченко², С.П. Батуев², А.В. Радченко²

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
alexandrkanut@gmail.com

Современные противоударные средства защиты представляют собой слоистую конструкцию из нескольких материалов. Одним из материалов, широко используемых в защитных конструкциях, является высокотвердая керамика. Наиболее широкое применение в противоударных конструкциях получили карбид бора (B_4C), карбид кремния (SiC), оксид алюминия (Al_2O_3). Керамические материалы имеют низкую плотность, высокие твердость, модуль упругости и прочность на сжатие. В тоже время керамика обладает низкой трещиностойкостью и прочностью на растяжение. Керамика располагается на фронтальной поверхности защитной конструкции, на подложке, которая обеспечивает защиту от фрагментов керамики и ударника. В качестве подложки используются пластичные металлические сплавы, полимерные материалы, композиты на основе углепластиков или органопластиков. В данной работе численно моделируется взаимодействие стального ударника с трехслойной преградой. Материал верхнего слоя преграды — карбид бора, последующие слои состоят из алюминиевого сплава D16T и композиционного анизотропного материала (органопластика). Исследуется широкий диапазон начальных скоростей взаимодействия и углов встречи. На контактных поверхностях между ударником и преградой реализованы условия скольжения без трения, на контактных поверхностях между слоями преграды — условия «слипания». Моделирование проводится в полной трехмерной постановке методом конечных элементов с использованием авторского алгоритма и программного комплекса EFES. Программный комплекс реализован на основе технологий OpenMP и Nvidia CUDA, позволяющей существенно сократить время расчета и повысить качество конечноэлементной сетки. В работе проведена апробация математических моделей поведения материалов и сравнение с существующими экспериментальными данными. Изучено влияние последовательности расположения металлического и композитного слоя на защитные свойства преграды. Выявлена эффективность параллелизации программного кода и проведено сравнение скорости расчета на центральном процессоре и видеоускорителе. Определены геометрические и кинематические параметры, при которых происходит рикошет ударника от преграды. Исследовано влияние ориентации осей симметрии ортотропного композита на ударно-волновую картину и разрушение слоистой преграды.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0002.

МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДНОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА С ГРАФЕНОМ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Г.Ф. Корзникова¹, А.Ф. Алетдинов¹, Е.А. Корзникова²

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

²Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
gfkorznikova@gmail.com

Интерес к медноматричным композитом связан с техническим прогрессом в современной микроэлектронике, который приводит к миниатюризации высокопроизводительных электронных устройств для улучшения доступности и удобства пользователя. Для этих интеллектуальных устройств необходимо эффективное рассеивание тепла, для предупреждения преждевременных отказов. Из-за ограничений компактной конструкции современных устройств рассеяние тепла становится сложной задачей. Для решения этих проблем в последние годы активно исследуются новые материалы и прежде всего металломатричные композиты на основе меди с углеродными наполнителями. Среди углеродных наполнителей наибольший интерес вызывает графен благодаря его исключительным механическим, электрическим и термическим свойствам. В ряде экспериментальных работ на тонких металлических пленках и порошках, покрытых слоем графена, были получены многообещающие результаты. Однако попытки масштабирования для получения объемных металломатричных композитов с графеновым наполнителем пригодных для практического применения не привели к ожидаемым результатам и полученные данные оказались противоречивыми, поскольку консолидированные образцы существенно отличались по механическим и теплофизическим свойствам, и, в целом, были ниже ожидаемых. Причинами такого несоответствия являются прежде всего способы получения исходных компонентов, методы консолидации, связанные как правило, не только с высоким давлением, но и с нагревом до высоких температур, а также агломерация графена, анизотропия свойств самого графена в продольном и поперечном направлениях и межфазное взаимодействие графен – металл. Решение этих проблем, даже для отдельных составов композитов позволит существенно продвинуться в разработке материалов с высокой электро- и теплопроводностью.

Одним из способов изготовления объемных металломатричных композитов является интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) под высоким давлением на наковальнях Бриджмена. Метод позволяет без разрушения и без изменения формы заготовок проводить деформирование при комнатной температуре до значительной суммарной степени деформации. ИПДК был успешно использован не только для деформационного наноструктурирования широкого ряда металлов и сплавов, но и для получения гетерогенных и градиентных структур, создания различных металломатричных композитов из исходных пластин чистых металлов, консолидации аморфных материалов с сохранением аморфной структуры и плотностью близкой к 100%. ИПДК позволяет целенаправленно изменять на наноуровне микроструктуру материалов, тем самым, добиваться в них существенного повышения комплекса свойств.

В работе продемонстрировано развитие этого перспективного направления и применение его для получения медноматричного композита армированного графеном путем компактирования тонких фольг меди, покрытых монослоем графена. Показано, что такой подход позволяет получить высокопрочный композит с однородной субмикроструктурной структурой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 23-29-00863.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СЛОИСТЫХ АМОРФНО-НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ, ДЕФОРМИРОВАННЫХ В КАМЕРЕ БРИДЖМЕНА

И.Е. Пермякова

ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия

ИМЕТ РАН, Москва, Россия

inga_perm@mail.ru

Аморфные сплавы (АС) вызывают повышенный интерес исследователей благодаря особой структуре и уникальным свойствам. Высокие прочность и твёрдость, большой предел упругой деформации, низкий коэффициент трения, хорошая устойчивость к коррозии и износу, отличные магнитомягкие характеристики обеспечивают внушительный потенциал для различных применений АС. Научный и практический интерес представляют также металломатричные композиты, т.к. современная техника и электроника нуждаются в перспективных материалах с повышенными свойствами. Получение, разработка АС и композитов с улучшенными свойствами являются важными и активно развиваемыми направлениями современного физического материаловедения.

В представленной работе созданы два типа многослойных композитных материалов, применяя технологию кручения под высоким давлением (КВД), где интенсивная пластическая деформация реализовывалась между наковальнями камеры Бриджмена.

Первый тип аморфно-нанокристаллических композитов (АНК 1) получен при КВД чередующихся слоёв аморфных сплавов разных по химическому составу: $\text{Fe}_{53,3}\text{Ni}_{26,5}\text{B}_{20,2}$ и $\text{Co}_{28,2}\text{Fe}_{38,9}\text{Cr}_{15,4}\text{Si}_{10,3}\text{V}_{17,2}$. Второй тип (АНК 2) – в ходе частичной аморфизации при КВД наноламинатов системы «медь-ниобий», сформированных предварительно многократной пакетной прокаткой.

Выявлен оптимизированный режим обработки КВД, обеспечивающий компромиссный баланс твёрдости и трещиностойкости полученных АНК 1: давление 6 ГПа, скорость вращения подвижной наковальни 1 об/мин и деформация $N = 4-6$ оборотов.

Обнаружен синергичный эффект значений HV для АНК 1: микротвёрдость композита при $N > 4$ превосходит значения HV его отдельных аморфных составляющих, из которых он образован. Установлены три стадии трансформации структурно-фазового состояния АНК 1. При $N = 1-3$ аморфные сплавы деформируются достаточно независимо, обеспечивая лишь механическое «сцепление» слоёв. При $N = 4-5$ происходит межфазное взаимодействие в приграничных областях с образованием боридных фаз, которое ответственно за эффект синергичного упрочнения. Наблюдается частичное вихревое перемешивание, но слоистость структуры всё ещё сохраняются. При $N = 6-9$, переносимые вихревые потоки вещества коагулируют вплоть до полного перемешивания и образования нового гибридного гомогенного многокомпонентного сплава.

Методами ПЭМ высокого разрешения и РСА в АНК 2 на основе наноламинатов Cu-Nb после КВД при $N = 4$ впервые обнаружено образование областей с аморфной структурой, непосредственно связанных с межфазными границами. Установлено трёхкратное увеличение микротвёрдости нанокompозитов Cu/Nb в процессе КВД. Обнаружен двухстадийный переход от анизотропии микротвёрдости в исходном состоянии к изотропии HV при $N = 4$.

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Fe-Co-Cr-Si-B ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Э.Н. Занаева, А.И. Базлов

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

zanaeva@misis.ru

Аморфное состояние металлических материалов, полученное в результате высоких скоростей охлаждения расплава, является технологичным прекурсором для формирования нанокристаллической структуры в металлических материалах различного назначения, в частности магнитомягких материалах на основе железа. Безредкоземельные магниты из сплавов системы Fe-Co-Cr, характеризуются происходящим в их структуре спинодальным распадом, формирующаяся при распаде двухфазная структура с сильно различными магнитными свойствами обеспечивает высокие показатели магнитной энергии этих сплавов в результате длительной многоступенчатой термической обработки. Предполагается, что использование аморфной структуры сплавов системы Fe-Co-Cr, легированных элементами-аморфизаторами В и Si, в качестве исходной, позволит значительно упростить термическую обработку для формирования магнитотвердого состояния: за счет сокращения времени изотермической выдержки при температурах распада, а также за счет устранения закалки из аустенитной области.

Работа посвящена исследованию магнитных материалов на основе аморфных сплавов системы Fe-Co-Cr-B-Si. Объектами исследования являлись металлические аморфные ленты толщиной ~ 20 мкм. Структурные исследования проводили методом рентгеновской дифрактометрии. Характеристические температуры сплавов определяли по термограммам, полученным методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Магнитные характеристики при комнатной температуре и при нагреве в магнитном поле измеряли на навесках лент методом вибрационной магнитометрии на магнитометре. Показано, что с увеличением содержания бора в составе механизм кристаллизации сплавов изменяется с первичной кристаллизации α -твердого раствора на эвтектический, в результате которого образуется наноразмерная смесь α -твердого раствора и высокотемпературной метастабильной фазы (Fe, Cr)₃B, стабильной к распаду до температуры 750°C. Исследованы закономерности влияния фазового состава на магнитные свойства сплавов при термической обработке. Установлено, что формирование наноразмерной эвтектической смеси [α + (Fe, Cr)₃B] в процессе кристаллизации аморфной фазы является необходимым условием получения высококоэрцитивного состояния в быстрозакаленных сплавах на основе системы Fe-Co-Cr, легированных Si и В.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00293, <https://rscf.ru/project/22-79-00293>.

**ТВЕРДОФАЗНАЯ СВАРКА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ
ЭП741НП//ВКНА-25****Э.В. Галиева¹, Е.Ю. Классман¹, В.А. Валитов¹, Р.Р. Габбасов^{1,2}**¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия,²Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия
galieva_elvina_v@mail.ru

В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям, направленным на получение высококачественных соединений из сплавов на основе никеля, в том числе интерметаллидных. В связи с этим данная работа посвящена исследованию возможности получения твердофазного соединения литого интерметаллидного сплава ВКНА-25 на основе Ni₃Al с порошковым жаропрочным никелевым сплавом ЭП741НП посредством сварки давлением.

В сплаве ЭП741НП посредством деформационно-термической обработки предварительно была сформирована ультрамелкозернистая структура смешанного типа. Ультрамелкозернистая микроструктура представляла собой смесь из некогерентных частиц γ' -фазы и зерен γ -фазы размером менее 1 мкм. Также в структуре присутствовали крупные (5-6 мкм) частицы γ' -фазы глобулярной формы, распределенные равномерно. Интерметаллидный сплав ВКНА-25 имел монокристаллическую структуру. Сплав ВКНА-25 представлял собой естественный эвтектический композит, с типичной для этого сплава дендритно-ячеистой структурой. Дендриты имеют двухфазное строение: γ - γ' -фазы, между которыми располагаются крупные междендритные частицы γ' -фазы.

Сварку давлением цилиндрических образцов диаметром 16 мм и высотой 16-20 мм проводили в вакууме ($P=5 \cdot 10^{-2}$ Па) в условиях сверхпластичности сплава ЭП741НП при температуре 1125°C. Термическая обработка включала закалку с температуры 1200°C и последующее старение при 950°C.

По результатам исследований было установлено, что вся деформация локализована в менее прочном жаропрочном сплаве ЭП741НП. Деформация сплава ВКНА-25 минимальна и не превышала 1 %.

Под воздействием высокой температуры, а также деформационного воздействия происходит активация диффузии легирующих элементов. Методом энергодисперсионного анализа установлено, что в зоне твердофазного соединения наблюдается диффузия Co и W из гранульного никелевого сплава ЭП741НП в сплав ВКНА-25, а также встречная диффузия Al из литого интерметаллидного сплава ВКНА-25 в сплав ЭП741НП. В результате этого формируется переходная зона диффузионного взаимодействия шириной 10-15 мкм. Микроструктура сплава ЭП741НП в процессе сварки трансформировалась из ультрамелкозернистой в мелкозернистую типа микродуплекс. Микроструктура сплава ВКНА-25 термически стабильна. После термической обработки произошла активация диффузии тугоплавких элементов, таких как Nb. Ширина диффузионной зоны увеличилась более чем в 2 раза. Микроструктура сплава ЭП741НП трансформировалась из мелкозернистой в крупнозернистую структуру. В микроструктуре сплава ВКНА-25 было выявлено небольшое утолщение прослоек γ -фазы, в которой выделены дисперсные частицы γ' -фазы. То есть микроструктура сплава ВКНА-25 практически не изменилась.

Работа выполнена в рамках Гранта РБ молодым ученым (Грант РБ 2023-2024, соглашение №1 от 14 августа 2023 г.).

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ИССЛЕДОВАНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А.Е. Волков¹, Е.В. Черняева¹, Н.А.Казаринов¹, Н.А.Волкова²

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия
a.volkov@spbu.ru

При деформировании или разрушении материалов вследствие неоднородности протекания этих процессов по времени и по объему происходит генерация сигналов акустической эмиссии (АЭ). Сигналы АЭ формируются под влиянием большого количества факторов, таких как: размер области, в которой происходит релаксация напряжения, сопротивление сдвигу, зависящее от плотности дефектов, распределение зерен по размерам и ориентациям и др. В связи с этим исследование АЭ широко применяется для оценки степени поврежденности (плотности дислокаций, микротрещин) элементов конструкций, находящихся под действием постоянных, периодических или случайных нагрузок. Одной из целей таких исследований является оценка остаточного ресурса. Наиболее простым методом анализа АЭ является подсчет общего количества сигналов и измерение скорости поступления сигналов. Однако, при таком подходе не учитывается форма сигналов во времени, что ограничивает возможности данного метода. Для учета формы сигналов применяются корреляционный анализ временного профиля сигнала и метод интегральных преобразований. Изучение спектров сигналов, полученных при преобразовании Фурье, позволяет произвести их разбиение на группы, найти усредненный спектр сигналов по каждой группе. Одной из проблем при использовании этих методов являются систематические и случайные искажения сигналов, возникающие в датчике, волноводе и в усилителе электрических сигналов. Все это делает практически невозможным восстановление исходного профиля сигнала. Ввиду этого, продуктивным методом является сравнение спектров сигналов, полученных при индентировании или деформировании "свежих" образцов и образцов, испытавших различные механические (в частности циклические) воздействия. Определение надежных способов сравнения позволит производить оценку остаточного ресурса деталей для принятия решения о возможности их дальнейшего использования. Наиболее простыми и вместе с тем достаточно информативными характеристиками спектров являются медианная частота и энергия сигнала. При всей продуктивности такой методики, не всегда удается четко зафиксировать изменение этих параметров. Поэтому актуальным является поиск других характеристик сигналов, позволяющих произвести их сравнение. В докладе рассматриваются два способа сравнения сигналов. Одним из них является построение сравнительного спектра (отношения спектров) сравниваемых сигналов, которое может исключить искажения, вносимые датчиком, и выявить только изменения спектра сигнала, произошедшие вследствие изменения структуры материала. Другой способ основан на том обстоятельстве, что запись сигнала, имеющая сложную изломанную форму, может быть рассмотрена, как фрактальная кривая, важнейшей характеристикой которой является фрактальная размерность. Эта характеристика изменяется при изменении условий формирования сигналов и, следовательно, может служить характеристикой для классификации сигналов АЭ.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭРОЗИИ НА ПОВЕДЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 С ПОКРЫТИЕМ TiN

С.А. Атрошенко^{1,2}, Р.З. Валиев^{2,3}, Н.Ф. Морозов² Р.Р. Валиев^{3,2}, Я.Н. Савина³, М.Н. Антонова², А.Д. Евстифеев²

¹ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

³Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

satroshe@mail.ru

Одной из основных причин снижения ресурса, надежности и сокращения срока службы авиационного двигателя является эрозионный износ поверхности ответственных деталей и изделий, так как авиационная техника эксплуатируется в агрессивных средах и в разных климатических условиях. Эрозионный износ происходит при действии абразивных частиц, движущихся с потоком газа или воздуха, и является достаточно сложным явлением ввиду многообразия форм твердых частиц, скоростей и углов атаки и траектории их движения. Эрозионный износ проявляется в изменении формы и геометрических размеров деталей, изменении шероховатости поверхности, структуры материала, прочностных характеристик и пр. В результате износа могут появиться задиры, трещины, увеличиваются шум и вибрация при работе, что в конечном итоге приводит к потере исправности или работоспособности.

В настоящей работе приведены результаты испытаний титанового сплава ВТ6 в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состоянии с осажденным на поверхность защитным покрытием TiN, которые проводились на экспериментальной установке аэродинамического типа в условиях экстремального воздействия – высокоскоростной динамической эрозии твердыми частицами корунда размером 109 мкм с максимальным углом атаки 90°.

Эрозионный износ поверхности зависит как от покрытия, так и от характеристик материала изделий, поэтому вместе с защитой поверхности покрытиями необходимо повышать механические свойства основного материала методами интенсивной пластической деформации для формирования ультрамелкозернистой структуры.

Проведено экспериментальное изучение износа и разрушения сплава ВТ6 с защитным покрытием TiN в исходном крупнозернистом (КЗ) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях при высокоскоростной динамической эрозии твердыми частицами корунда средним размером 109 мкм в воздушном потоке со скоростью - 150 м/с и временем экспозиции – 30 с, 1, 3, 5 и 10 мин. В результате экспериментов определялся эрозионный износ, на поверхности замерялась доля вязкого разрушения - % волокна, а также глубина разрушенного слоя, изменение микротвердости и структуры сплава вблизи эрозионной поверхности с покрытием и без него. Установлено, что при столь высокоскоростном эрозионном воздействии износ и разрушение происходит у всех образцов сплава, но их закономерности тесно связаны с временем экспозиции и структурой подложки.

Работа выполнена в рамках проекта «Динамика и экстремальные характеристики перспективных наноструктурированных материалов» (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-1114) и по грантам РФФИ № 22-11-00091 и РФФИ № 23-79-10118. Авторы благодарят Николаева М.М., ученика 8 класса авторской школы «Горный» за помощь в подготовке и исследовании структуры образцов.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.М. Бойко, В.А. Марихин, Л.П. Мясникова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
yuri.boiko@mail.ioffe.ru

В настоящее время благодаря усовершенствованию структурно-кинетических принципов ориентационного упрочнения полимеров удаётся получить сверхпрочные и сверхвысокомодульные материалы с экстремальными значениями прочности при растяжении (до 6 ГПа) и модуля упругости (до 230 ГПа), которые на 2 десятичных порядка превосходят аналогичные показатели для полимеров в неориентированном состоянии. Такие материалы, являющиеся “рекордсменами” по удельным (отнесённым к плотности) показателям, очень перспективны при использовании в качестве армирующих элементов высокопрочных композитных изделий. В этой связи для обеспечения высокой надёжности прогнозирования их длительных эксплуатационных свойств возникает необходимость разработки новых статистически обоснованных подходов определения достоверных механических показателей на базе больших массивов данных (десятки–сотни измерений идентичных образцов). Несмотря на резкое увеличение трудоёмкости за счёт существенного увеличения числа измерений, данный подход открывает новые возможности не только для повышения степени достоверности определяемых механических характеристик, но и для получения ценной информации о корректных типах их статистических распределений, что необходимо для лучшего понимания механизмов деформирования и разрушения. Анализируются статистические распределения предельных механических характеристик – прочности и удлинения при разрыве – ряда высокопрочных полимерных материалов с различной архитектурой цепи (сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиамид-6 и полипропилен) и различным типом образца (моно- или полифиламентные плёночные нити и волокна). Для этих целей впервые использована совокупность графических методов (графики Вейбулла, нормальной вероятности, квантиль–квантиль и функции плотности вероятности Гаусса) и тестов на нормальность (тесты Колмогорова-Смирнова, Шапиро-Уилка, Лиллиефорса, Андерсона-Дарлинга, К-квадрата Д’Агостино и Чена-Шапиро). Установлены критерии справедливости нулевой гипотезы нормальной вероятности распределений. Обсуждается применимость данных подходов для корректного описания распределений прочности и удлинения при разрыве в зависимости от гибкости и химической структуры полимерной цепи, а также от типа образца. Показано, что указанные факторы являются важным аспектом данной проблемы. В частности, важно учитывать, что образец полифиламентного волокна, включающий в себя несколько сотен единичных волокон, сам по своей природе уже является статистическим объектом, тогда как индивидуальное волокно к такому не относится. Эти особенности находят отражение в характере статистического распределения, что позволяет оценить надёжность эксплуатации образца. Важность данного подхода заключается в возможности идентифицировать механизм разрушения материала посредством его отнесения либо к критическому характеру протекания локализованных процессов на поверхности, либо к равновероятностному характеру их протекания в объёме образца в случае справедливости модели Вейбулла или нулевой гипотезы, соответственно.

ПЕРЕХОД МЕХАНИКИ ЗАМЕДЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ В МИКРОМЕХАНИКУ

В.М. Мишин¹, Г.А. Филиппов², Д.В. Щитов¹

¹Северо-Кавказский федеральный университет, филиал г. Пятигорск, Россия,

²ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия

mishinvm@yandex.ru

Замедленное хрупкое разрушение (ЗХР) сталей содержащих мартенсит характеризуется процессом зарождения трещины через длительное время при приложении постоянной нагрузки. Его кинетическая природа связана с действием остаточных внутренних напряжений в вершинах кристаллов мартенсита выходящих на границы исходных аустенитных зерен после закалки. Их действие приводит к зарождению микротрещин на границах исходных аустенитных зерен. Одновременно, охрупчивающим фактором являются сегрегации примесей способствующих понижению прочности границ исходных аустенитных зерен – серы, фосфора, сурьмы и др., а также повышенная концентрация водорода на границах зерен.

Считается, что различными физическими методами необходимо установить наличие трещины и дать прогноз на ее возможное развитие. Механика разрушения позволяет дать такой прогноз с помощью коэффициентов интенсивности напряжений определив пороговый коэффициент.

Однако работы авторов показали, что критерием (ЗХР) является критерий зарождения трещины – локальное пороговое напряжение в зоне концентрации напряжений.

Таким образом, нельзя допускать зарождения микротрещины по механизму ЗХР. Зарождение микротрещины неминуемо приводит к ее развитию и достижению критического значения коэффициента интенсивности напряжений и, соответственно, разрушению детали.

В механике разрушения расчет критического коэффициента интенсивности напряжений облегчается тем, что метод рассматривает среду как однородную и изотропную. Поэтому, легко применимы математические методы моделирования напряженно-деформирования в вершине уже имеющейся трещины. При этом, такие факторы как размер зерен, остаточные внутренние микронапряжения, охрупчивание границ зерен сегрегациями примесей и водородом не принимаются в расчет.

Однако, процесс ЗХР высокопрочной стали зависит, не только от уровня напряжений в вершине уже существующей трещины, но и структурных факторов – размера зерна, наличия остаточных внутренних микронапряжений (после закалки), охрупчивающего воздействия на границы зерен сегрегаций примесей и водорода.

Поэтому, предлагается методика для определения пороговых нагрузок, основанная на подходах микромеханики разрушения, учитывающих влияние размера зерен стали, охрупчивающее влияние сегрегаций примесей и водорода. Методами математического моделирования возможно определять напряженно-деформированное состояние стали в месте, где должна зародиться микротрещина. Используется методика, разработанная Е.М. Морозовым для определения локальных напряжений в месте концентрации напряжений. При этом учитывается размер зерен, снижение локальной прочности границ исходных аустенитных зерен остаточными внутренними микронапряжениями, сегрегациями охрупчивающих примесей (серы, сурьмы, фосфора) и водородом.

ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИНЫ В СТАЛИ 08ГДНФЛ МЕТОДАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Е.Е. Дамаскинская¹, Д.И. Фролов¹, Е.Ю. Нефедьев², Л.О. Стояновский³

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

³СПбПУ имени Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

pe246@ya.ru

Доля усталостного разрушения в технике очень велика. Это связано с тем, что разрушение конструкций в результате действия периодических нагрузок происходит при напряжениях много меньших предела текучести. В настоящее время макроскопические закономерности роста усталостной трещины в металлах хорошо изучены методами механики разрушения. Метод акустической эмиссии (АЭ) также применялся для исследования роста усталостных трещин разными исследователями, однако микроскопическая природа АЭ этого процесса недостаточно изучена.

Проведены исследования роста усталостной трещины в широко используемой конструкционной стали 08ГДНФЛ. Исследование проводилось на образцах натурной толщины 150 мм типа 6Т-СТ. Продвижение трещины исследовалось методами механики разрушения и АЭ. Для понимания влияния структуры на рост усталостной трещины использовались методы количественной металлографии. Показано, что усталостное разрушение связано с размером структурных элементов. Методами АЭ и растровой микроскопии исследовался микромеханизм роста трещины на линейном участке диаграмм циклического разрушения, представляющем наибольший практический интерес. Для описания кинетики изменения статистических параметров распределения микротрещин по размерам поверхность разрушения исследовалась методом количественной растровой электронной микроскопии. В образцах, вырезанных из поверхности разрушения, были измерены все хрупкие фасетки скола и вторичные трещины величиной более 5мкм и зафиксированы места их расположения по мере продвижения фронта усталостной трещины.

Исследование позволило обнаружить, что микротрещины возникают на границе зоны пластической деформации перед вершиной макротрещины. Амплитудное распределение сигналов АЭ отражает реальное распределение микротрещин, формирующихся перед вершиной магистральной трещины. Скорость движения магистральной макротрещины определяется заранее созданной системой микротрещин. Между скоростью роста усталостной трещины и среднеквадратическим отклонением амплитудного распределения сигналов АЭ наблюдается связь. Полученная связь параметра АЭ со скоростью роста трещины позволяет прогнозировать усталостное разрушение конструкционных сталей.

Таким образом, показано, что при усталостном разрушении структура стали связана с размерами образующихся микротрещин. Размеры микротрещин, в свою очередь, определяет амплитуды излучаемых при этом сигналов АЭ. Регистрируя сигналы АЭ, можно дистанционно контролировать скорость усталостного разрушения.

Предложенный метод контроля роста усталостных трещин в крупногабаритных конструкциях ответственного назначения позволяет предупреждать об опасности надвигающегося усталостного разрушения для своевременного ремонта дефектных участков.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГИБРИДНОГО КОМПОЗИТА**П.О. Русинов, Г.В. Курапов, М.Д. Семадени**Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
ruspiter555@gmail.ru

Проблема повышения надежности, долговечности и расширения функциональных возможностей изделий, узлов и агрегатов, работающих в условиях многофакторных воздействий (температурных, силовых, деформационных) может быть успешно решена разработкой и применением гибридных композитных материалов. Разработаны гибридные композитные материалы, включающие высокоэнтропийные AlCoCrCuFeNi и керамические B4CCoMo слои. Формирование гибридных композитов, осуществлялось с помощью новой разработанной технологии их формирования. Разработанная технология включает: высокоэнергетическую механическую обработку, HVOF в защитной атмосфере, высокотемпературную термомеханическую обработку, термическую обработку.

Целью настоящей работы является исследование структурных особенностей и свойств гибридного композита Hastelloy X – AlCoCrCuFeNi - B4CCoMo, содержащих высокоэнтропийный AlCoCrCuFeNi и керамические слои B4CCoMo, полученных методом HVOF с последующей высокотемпературной термомеханической обработкой в защитной атмосфере (среда аргона).

Высокотемпературная термомеханическая обработка слоев AlCoCrCuFeNi, B4CCoMo, композитных материалов Hastelloy X(NiCrFeMo) – AlCoCrCuFeNi - B4CCoMo, включала пластическое деформирование при высокой температуре и термическую обработку (отжиг). После высокоэнергетической механообработки порошков AlCoCrCuFeNi, B4CCoMo их формирования с применением HVOF в среде аргона, последующей высокотемпературной термомеханической обработки, наблюдается снижение пористости слоев композитов до 1%, повышение адгезионной прочности до 162-183 МПа.

Размер зерна в слоях композитного материала Hastelloy X – AlCoCrCuFeNi – B4CCoMo, полученного HVOF с последующей термомеханической обработкой при высокой температуре в защитной атмосфере аргона, составил: AlCoCrCuFeNi - 75 до 123 нм; B4CCoMo - 86 до 163 нм. Толщина слоев гибридных композитных материалов Hastelloy X – AlCoCrCuFeNi - B4CCoMo, составила: AlCoCrCuFeNi – 1-1,3 мм; B4CCoMo – 0,5-0,7 мм. Данная толщина слоев композитов, является оптимальной с точки зрения механических свойств гибридных композитов. Результаты рентгенофазового анализа показали: что слой AlCoCrCuFeNi состоит из упорядоченных и неупорядоченных фаз с объёмно-центрированной кубической решеткой (BCC), небольшого количества фаз с гранцентрированной кубической решеткой (FCC) и аустенитных B2 фаз с кубической решеткой; керамический слой B4CCoMo состоит из фаз B4C с ромбоэдрической решеткой, фаз Co с гексагональной решеткой, фаз B4C2Co22 с кубической решеткой, Mo с кубической решеткой.

В результате проведения механических испытаний на изгиб при вращении: предел выносливости образцов из сплава Hastelloy X (NiCrFeMo), составил 340 МПа, с композитными поверхностными слоями AlCoCrCuFeNi - B4CCoMo, составил 385МПа

Работа выполнена в рамках Российского Научного Фонда, проект 23-23-00074.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА TiNi, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ**Р.М. Бикбаев¹, Н.Н. Реснина¹, С.П. Беляев¹, I.A. Palani², T. Geethapriyan²**¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия²Discipline of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Indore, Indore, India

BikbaevRM@yandex.ru

Цель работы заключалась в исследовании функциональных свойств образцов сплава TiNi полученных методом электродуговой послойной наплавки (ЭДПН) с различными параметрами. Полученные результаты показали, что образцы сплава TiNi, наплавленные на титановую подложку, проявляют все функциональные свойства: эффекты памяти формы и обратимой памяти формы после деформации в мартенситном состоянии, изменение обратимой деформации при охлаждении и нагревании под нагрузкой, псевдоупругое поведение при деформировании в аустенитном состоянии. Однако, функциональные свойства существенно отличаются от свойств сплава TiNi с таким же химическим составом, полученного традиционными технологиями. Неоднородное распределение химических элементов в слоях образца, полученного ЭДПН, приводит к тому, что наблюдается стадийное изменение деформации, связанное с различными температурами превращения в различных слоях. Установлено, что наличие слоя TiNi с избытком титана в рабочей области, а также существование крупных частиц Ti₂Ni в этом слое, создают дополнительные внутренние напряжения во время предварительной деформации, что приводит к возрастанию величины эффекта обратимой памяти формы. Вместе с тем, наличие такого слоя подавляет псевдоупругость поскольку предел дислокационного скольжения в слое TiNi с избытком титана ниже, чем предел наведения мартенсита в этом слое и в слоях с избытком никеля. Как следствие, при деформации слой с избытком титана деформируется пластически, а слои с избытком никеля деформируются упруго. Это приводит к тому, что эффект псевдоупругости не проявляется. Исключение слоя TiNi с избытком титана из рабочей области позволяет наблюдать псевдоупругое поведение сплава TiNi, полученного методом ЭДПН.

Установлено, что с увеличением напряжения электрической дуги при наплавке, увеличивается объем расплавляемой титановой подложки во время нанесения 1-го слоя и, как следствие, увеличивается концентрация титана в расплаве TiNi, что приводит к увеличению объемной доли частиц фазы Ti₂Ni. Образование частиц Ti₂Ni приводит к охрупчиванию образцов и уменьшению объемной доли фазы TiNi, испытывающей мартенситные превращения. Повышение температуры подложки уменьшает эффект памяти формы, псевдоупругость и необратимую деформацию. Это связано с тем, что с увеличением температуры подложки, увеличивается острота [001] текстуры. В то же время, известно, что в сплавах TiNi наблюдается сильная ориентационная зависимость функциональных свойств, и после растяжение вдоль ориентации [001] наблюдается наименьшая обратимая деформация.

Работа выполнена в рамках совместного проекта РФФ (№ 19-49-02014)-DST (№ DST/INT/RUS/RSF/P-36).

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТОВ МЕДИ НА КАЧЕСТВО ИХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКОЙ

А.А. Мухаметгалина, Э.Р. Шахметова, М.А. Мурзинова, А.А. Саркеева, А.А. Назаров

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа
a.mukhametgalina@mail.ru

Ультразвуковая сварка (УЗС) – метод твердофазного соединения тонких металлических заготовок, осуществляемый при одновременном воздействии сжимающей силы и высокочастотных сдвиговых колебаний. На качество соединений, полученных УЗС, влияет множество параметров (амплитуда колебаний, длительность сварки, свойства материалов и т.д.). К этим параметрам относится и состояние поверхностей соединяемых заготовок, от которого зависит коэффициент трения и температура в зоне контакта. Данное исследование проведено с целью оценки влияния шероховатости поверхности и наличия естественной оксидной пленки на качество соединений листов меди, полученных УЗС.

Для исследования использовали листы технической чистой меди марки М1 толщиной 0,8 мм с параметром шероховатости $Ra = 0,10$ мкм, из которых вырезали пластины размерами 50 мм×20 мм. Пластины исходного листа с естественным оксидным слоем представляли первую серию образцов. Пластины серии 2 шлифовали на бумаге P1200, что обеспечило удаление естественного оксидного слоя и получение поверхности с тем же параметром шероховатости $Ra = 0,10$ мкм, что и у исходного листа. Пластины серии 3 шлифовали на бумаге P240 до чистоты $Ra = 0,47$ мкм. УЗС проводили на экспериментальной установке с частотой 20 кГц и амплитудой 15 ± 1 мкм, при усилии сжатия 2,5 кН и длительности 2 с.

Результаты испытаний на срез при растяжении показали, что наиболее прочными оказались соединения образцов серии 2, усилия и работа разрушения которых составляли 2010 ± 56 Н и $3 \pm 0,3$ Дж, соответственно. Увеличение параметра Ra от 0,10 мкм (серия 2) до 0,47 мкм (серия 3) привело к снижению усилия разрушения до 1592 ± 51 Н и работы разрушения до $0,6 \pm 0,1$ Дж. Соединения листов серии 1 также демонстрировали меньшие значения усилий (1800 ± 44 Н) и работы разрушения ($1,5 \pm 0,2$ Дж) по сравнению с соединениями образцов серии 2. На поверхностях разрушения всех образцов наблюдались очаги схватывания с развитым ячеистым рельефом. Доля площади этих очагов была наибольшей на поверхностях разрушения образцов серии 3 и составляла около 79%, тогда как для образцов серии 1 и 2 она составляла 55-58%. Увеличение шероховатости поверхности пластин повлияло на разогрев в зоне контакта в процессе УЗС. Максимальная температура, 300°C , была достигнута при УЗС образцов серии 3, минимальная – 230°C – при УЗС образцов серии 2. Присутствие оксидного слоя на поверхности образцов серии 1 привело к повышению температуры со 230 до 280°C .

Результаты работы показали, что состояние поверхности медных листов существенно влияет на температуру в зоне соединения, площадь очагов схватывания, образующихся в процессе УЗС, и их способность сопротивляться разрушению. Поэтому для достижения оптимальной прочности соединений необходимо уделить должное внимание подготовке поверхностей соединяемых заготовок.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 22-19-00617. Микроструктурные исследования проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН "Структурные и физико-механические исследования материалов".

ЛОКАЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЛЬДА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ ВЕРТОЛЁТНЫХ ПРОЩАДОК ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

С. М. Ковалев¹, А. В. Орехов², Г. В. Павилайнен²

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ), Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Санкт-Петербург, Российская Федерация
g.pavilaynen@spbu.ru

Современная наука о прочности и пластичности конструкций предоставляет широкие возможности для проектирования и возведения экономичных сооружений при одновременном обеспечении их высокой надёжности в экстремальных условиях эксплуатации. К таким конструкциям относятся буровые платформы для шельфовой добычи углеводородов и вертолётные площадки. В работе делается оценка локальной прочности и анизотропии льда на основе экспериментальных исследований и предложено решение задачи изгиба ледяного поля над поверхностью воды при воздействии на него сосредоточенной нагрузки, моделирующей посадку и взлёт вертолета. Обсуждается влияние поверхностного натяжения льда и делается его оценка. Определён прогиб льда под действием нагрузки от 3 до 12 Тс, соответствующей различным маркам используемых вертолетов и даны оценки допустимой толщины льда, обеспечивающей безопасную прочность конструкции.

В Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте в рамках научно-исследовательских и технологических работ (НИТР) Роскомгидромета в 2020–24 годах разрабатывается тема «Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения».

Лёд, как строительный материал, является достаточно специфическим, поскольку его локальная прочность колеблется в широком диапазоне. Исследованиям по определению прочности льда уделяется особое внимание в связи с возросшими задачами проектирования и строительства инженерных сооружений на арктическом шельфе. Диапазон изменения локальной прочности льда достаточно широк и колеблется в пределах от 12 до 40 МПа, что связано с влиянием таких параметров как температура, солёность, строение, анизотропия, возраст льда и период года. Соответственно эти параметры влияют на несущую способность льда и его трещинностойкость при многократном использовании. Отдельным вопросом является оценка изгибной жёсткости льда и её изменении в зависимости от параметров эксплуатации вертолётной площадки и диапазона температур.

Работа выполнена в Федеральном бюджетном государственном учреждении «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» в рамках проекта 5.1 НИТР Росгидромета и в Санкт-Петербургском государственном университете с поддержкой гранта РНФ 19-01-00208.

**МНОГОЦИКЛОВАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТАЛОСТЬ NiTi,
ПРИМЕНЯЕМОГО В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА ТОРСИОННОГО ПРИВОДА**
А.В. Сибирев, С.П. Беляев, Н.Н. Реснина

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
alekspb@list.ru*

Одним из применений сплавов с эффектом памяти формы (СЭПФ) является использование их в качестве материала рабочего тела различных приводов. Однако, при увеличении числа циклов в СЭПФ происходят изменения величин эффектов памяти формы, температур их проявления, и наблюдается накопление необратимой деформации. Поэтому для того, чтобы продлить ресурс привода необходимо выбирать оптимальные параметры его эксплуатации: температурный режим и деформационно-силовые параметры. Целью данной работы было исследование влияния температурного интервала эксплуатации привода (его доли и положения по отношению к полному интервалу мартенситных превращений) на величины эффекта памяти формы, реактивных напряжений и работоспособности сплава NiTi, работающего в режиме привода.

Объектом исследования выбраны образцы сплава NiTi, которые испытывали в режиме кручения. Для инициирования эффекта памяти формы образцы предварительно деформировали до 3, 5 или 7% при комнатной температуре в мартенситном состоянии, разгружали и соединяли с упругим контр-телом. Затем образцы подвергли термоциклированию в режиме привода в различных температурных интервалах. Количество термоциклов выполненных в различных условиях варьировали от 15 до 1000.

Установлено, что термоциклирование в неполном температурном интервале превращений приводит к улучшению термоциклической стабильности свойств сплава, т.е. меньшим изменениям величин реактивных напряжений, обратной деформации и произведённой работы при том же числе циклов. При прочих равных условиях, сдвиг интервала термоциклирования в сторону более высоких температур, т.е. смещение нижней температуры выше M_s , позволяет снизить накопление пластической деформации в циклах и повышает стабильность функциональных свойств сплава NiTi за счет исключения последней четверти прямого превращения при термоциклировании, в которой и происходит интенсивное дислокационное скольжение. Показано, что верхняя температура цикла не должна превышать A_s , поскольку происходит разупрочнение сплава, что интенсифицирует накопление пластической деформации в циклах и ухудшает стабильность параметров привода. На основе полученных данных были выбраны оптимальные режимы термоциклирования и исследована функциональная усталость сплава NiTi при испытаниях в торсионном приводе на базе 1000 циклов. Полученные результаты подтвердили выводы, сделанные на малом количестве циклов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20021 (<https://rscf.ru/project/22-29-20021/>) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением № 40/2022 от «14» апреля 2022 г.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА Ti-51 ат.% Ni С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКЕ ПОД ПОСТОЯННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

А.М. Иванов, С.П. Беляев, Н.Н. Реснина

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия
a.ivanov@spbu.ru

В работе рассматриваются особенности деформирования закаленного сплава Ti-51 ат.% Ni в результате выдержки при постоянных температуре и напряжении. В процессе выдержки под постоянной нагрузкой обнаружено изменение деформации, которая восстанавливалась при последующем нагревании. Это явление наблюдали при выдержках после частичной реализации эффекта пластичности превращения, сверхупругости и эффекта обратимой памяти формы. При всех режимах обратимая деформация при выдержке накапливалась до максимального значения, которое зависело от температуры выдержки немонотонно. Максимальный прирост изотермической деформации наблюдали при температурах, находящихся внутри интервала прямого перехода. Увеличение напряжения, при котором производили выдержку, приводит к монотонному увеличению максимальной изотермической деформации. Установлено, что величина изотермической деформации зависит от режима деформирования. Деформация, полученная при выдержке после наведения мартенсита под нагрузкой, в 4 раза превышает деформацию, накопленную при выдержке после охлаждения под нагрузкой.

Обнаружено, что при повторяющихся выдержках изотермическая деформация с циклами уменьшается. Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением номера цикла, возрастает величина упругой энергии, связанной с мартенситным превращением. Предполагается, что величина изотермической деформации зависит от величины упругой энергии, запасаемой при превращении. Чем больше упругая энергия, тем больше напряжения, препятствующие росту мартенситной фазы, тем меньше количество ориентированного мартенсита может образоваться при выдержке и тем меньше изотермическая деформация. Показано, что различие в величинах деформации, полученных при выдержке после охлаждения под нагрузкой или после наведения мартенсита под нагрузкой, связано с различной величиной упругой энергии, запасаемой при превращении.

Предполагается, что изотермическая деформация определяется наличием точечных дефектов замещения в кристаллической структуре сплава. Чем меньше концентрация дефектов замещения, тем меньше изотермическая деформация. Для подтверждения этого предположения, закаленный сплав Ti-51 ат.% Ni подвергали отжигу, в результате которого в структуре сплава образовались частицы фазы Ti_3Ni_4 , а в матрице уменьшилась концентрация дефектов замещения, в качестве которых в закаленном сплаве выступали избыточные атомы никеля, занимающие места титана. Обнаружено, что изменение деформации при выдержке в отожженном сплаве оказалось в 12 раз меньше, чем в закаленном сплаве.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №18-19-00226).

МОДЕЛЬ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В Al-Cu СПЛАВАХ

Н.А. Грачёва, Е.В. Фомин, А.Е. Майер

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

nagra45da@gmail.com

В данной работе с помощью метода молекулярной динамики проведены расчеты по деформированию Al-Cu твердого раствора, исследованы механизмы релаксации напряжений и сформулирована теоретическая модель. Модель с применением машинного обучения позволяет описать процесс релаксации напряжений, связанный с дислокационной пластичностью и структурными фазовыми переходами. Для определения параметров модели использовался метод Байесовской идентификации параметров. В работе исследовался широкий диапазон температур и различная концентрация меди в матрице алюминия. На основе результатов моделирования построено уравнение состояния Al-Cu твердого раствора в виде искусственной нейронной сети. Другая нейронная сеть обучена определять порог нуклеации дислокаций и вычислять модуль сдвига и модуль всестороннего сжатия.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-11-20153-П, <https://rscf.ru/project/23-11-45024/>.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ CoCrFeMnNi и CoCrNi

Д.О. Астапов^{1,2}, К.А. Реунова¹, Е.Г. Астафурова¹, Д.Ю. Гуртова^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

²НИ Томский государственный университет, Томск, Россия

denis.0612@mail.ru

В настоящей работе были изучены микроструктура, фазовый состав, механические свойства, механизмы деформации и разрушения многокомпонентных сплавов FeMnCrNiCo и CoCrNi в интервале температур 77–297 К. Для исследования были выбраны эквиатомные сплавы $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{20}$ (сплав Кантора) и $\text{Co}_{33,4}\text{Cr}_{33,3}\text{Ni}_{33,3}$. Образцы сплавов были подвергнуты термомеханической обработке: отжигу при температуре 1200 °С в течение 2 ч, холодной прокатке до 80 % и повторному отжигу при температуре 1200 °С в течение 2 ч для сплава Кантора; холодной прокатке до 80 % и отжигу при температуре 1150 °С в течение 1 ч с последующей закалкой в воду для сплава CoCrNi. Исследования проведены с использованием методов сканирующей (СЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа (РСА), одноосного статического растяжения.

Оба сплава обладают однофазной структурой с ГЦК-кристаллической решеткой. Благодаря отсутствию Mn и Fe в составе трехкомпонентного сплава, его параметр решетки $a = 3,563 \text{ \AA}$ оказывается меньше, чем у сплава FeMnCrNiCo ($a = 3,598 \text{ \AA}$). Методом СЭМ показано, что образцы сплавов FeMnCrNiCo и CoCrNi характеризуются крупнокристаллической разориентированной структурой: у сплава Кантора средний размер зерна составляет 215 мкм, а у трехкомпонентного – 57 мкм.

Независимо от состава сплава с понижением температуры испытания увеличивается как предел текучести $\sigma_{0,2}$, так и предел прочности σ_B . Во всем температурном интервале наибольшие значения $\sigma_{0,2}$ и σ_B соответствуют сплаву CoCrNi, достигают максимума при $T = 77 \text{ К}$ и составляют 501 МПа и 1115 МПа, соответственно. У сплава FeMnCrNiCo при температуре жидкого азота механические свойства ниже $\sigma_{0,2} = 385 \text{ МПа}$, а $\sigma_B = 947 \text{ МПа}$. Установлено, что оба многокомпонентных сплава обладают достаточно хорошим запасом пластичности. Сплав Кантора при температуре испытания 77 К обладает наибольшими значениями удлинения до разрушения $\delta = 97 \%$ (63 % при комнатной температуре), однако трехкомпонентный сплав CoCrNi также имеет высокие пластические свойства ($\delta = 83 \%$ при 77К и $\delta = 91 \%$ при 297 К).

Установлено, что деформационное поведение и механические свойства сплавов определяются их механизмами деформации. Методом ПЭМ было показано, что при комнатной температуре испытания основным механизмом деформации обоих сплавов является дислокационное скольжение. При пониженных температурах испытания в исследуемых сплавах происходит активация механического двойникования. Анализ СЭМ-изображений структуры поверхностей разрушения образцов демонстрирует, что при комнатной температуре и температуре жидкого азота для обоих сплавов характерно вязкое транскристаллитное разрушение.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00261, <https://rscf.ru/project/20-19-00261/>. Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

РОЛЬ НАНОПОРИСТОСТИ И СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТИТАНА VT1-0

**В.И. Бетехтин¹, М.В. Нарыкова¹, А.Г. Кадомцев¹, Ю.Р. Колобов^{2,3}, С.С. Манохин²,
О.В. Амосова¹**

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

²ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

³Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия
Vladimir.betekhtin@mail.ioffe.ru

Изучается влияние различного типа обработок на долговечность титана VT1-0, испытанного в режиме ползучести и усталости. Анализируются данные по влиянию на длительную прочность следующих внешних воздействий:

- интенсивная пластическая деформация;
- высокое гидростатическое давление;
- дополнительная обработка поверхности (лазерными импульсами либо нанесением покрытия).

Исследования проводились на одном типе сплава технического титана - VT1-0. Образцы титана испытывались в режиме усталости (при комнатной температуре) либо растяжении в режиме ползучести. Основным эффектом от всех перечисленных воздействий является повышение долговечности и прочности титанового сплава.

Анализ полученных экспериментальных данных по изучению долговечности VT1-0 позволил также сделать следующие выводы и предположения. Наиболее ярко эффект повышения прочностных свойств при длительных испытаниях проявляется после перевода VT1-0 в ультрамелкозернистое (УМЗ) состояние. Такое повышение обусловлено существенным изменением структуры (уменьшением среднего размера зерна, изменений ориентации границ, плотности дислокаций и т.д.).

Дополнительная обработка образцов высоким гидростатическим давлением привела к дальнейшему повышению длительной прочности. Сильнее это влияние проявляется на титане УМЗ состоянии при высоких напряжениях и относительно небольших количествах циклов. Увеличение числа циклов на порядок приводит к заметному уменьшению упрочнения, то есть эффект влияния давления оказывается слабым. Проведенные исследования позволяют полагать, что эффект повышения долговечности УМЗ материалов связан с уменьшением объемной доли нанопор.

Проведение поверхностной обработки (лазерные импульсы наносекундной длительности, микродуговое окислирование) также привело к повышению усталостных характеристик. Более существенный эффект, также как и в случае обработки давлением, наблюдался для УМЗ состояния. Величина повышения предела усталостной прочности уменьшалась при увеличении числа циклов.

Анализируются закономерности повышения механической и термической стабильности при различных режимах нагружения высокопрочных металлических материалов на примере титана.

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ CdWO_4

Е.Б. Борисенко, Н.Н. Колесников, Б.С. Редькин, В.И. Орлов, А.В. Тимонина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна Российской академии наук
borisenk@issp.ac.ru

Кристаллы вольфрамата кадмия, известные своими скинтилляционными свойствами, принадлежат семейству шеелита. В это семейство входят тетрагональные кристаллы шеелитов и моноклинные кристаллы вольфрамитов. CdWO_4 относится к последним, т.к. в его элементарной ячейке угол между a и c составляет 91.5° . Различия в кристаллической сингонии связаны с радиусом катиона кристаллов, если он больше 10^{-10} м, кристаллы имеют моноклинную решетку, если меньше – тетрагональную. Цепочки атомов кадмия и кислородных октаэдров, окружающих атом вольфрама, расположены зигзагообразно параллельно плоскости (100) и уложены как гпу решетка. Такие кристаллы не обладают пластичностью, и их механические свойства мало изучены, несмотря на то, они что важны для изготовления счетчиков.

Наши эксперименты показывают, что кристаллы вольфрамата кадмия удается пластически деформировать при температурах 300-600°C. При температуре выше 800°C образуется летучий CdO и стехиометрия кристалла нарушается. Кривые деформации демонстрируют резкий спад нагрузки и продолжение деформации при максимальной достигнутой до спада нагрузки. Такой вид кривых указывает на двойникование, как механизм деформации. Двойники в этих кристаллах наблюдаются с помощью световой микроскопии, как клиновидные с плоскостью двойникования $\{011\}$, так и полисинтетические с плоскостью двойникования $\{100\}$. С помощью рентгеноструктурного анализа при съемке деформированных монокристаллов было подтверждено присутствие механических двойников.

Дальнейшие исследования показали, что в CdWO_4 присутствуют ростовые дислокации скользящие в системе $(100)\langle 001 \rangle$. Эта система скольжения активна при индентировании плоскости (010), тогда как при индентировании плоскости (100) действует система скольжения $(010)\langle 001 \rangle$. После механической резки и полировки в поверхностном слое на боковых гранях кристаллов (100) и (001), а также в объеме образцов наблюдаются асимметричные геликоидальные ямки травления в рядах $\langle 001 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$, образованные наклонными к поверхности дислокациями. Эти частичные дислокации, образованные в результате диссоциации полных дислокаций: $a_{[100]} = 1/2[101] + 1/2[10\bar{1}]$ или $a_{[001]} = 1/2[011] + 1/2[0\bar{1}1]$ могут одновременно скользить и переползать. Например, дислокация $1/2[10\bar{1}]$ состоит из винтовой части, которая скользит в направлении $[100]$ и частичной сидячей дислокации, которая движется переползанием в направлении $[001]$. Таким образом, подобная дислокация может участвовать в образовании механических двойников при пластической деформации. При отжиге кристаллов при температуре 600-650°C происходят процессы возврата, толщина наклепанного слоя и плотность дислокаций в объеме уменьшаются в несколько раз. Вместо геликоидальных ямок появляются симметричные огранные небольшие ямки травления, что указывает на устранение дефектов упаковки при дислокационной реакции, приводящей к образованию полной дислокации вместо частичных.

ДВУХУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ПРОСЛОЙКИ НА ДЕФОРМАЦИЮ И РАЗРУШЕНИЕ ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ АДДИТИВНОГО АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВОГО СПЛАВА

Д.Д. Гатиягуллина^{1,2}, А.В. Землянов¹, Р.Р. Баллонов¹, И.Р. Ивашов¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

gdiana0510@gmail.com

Аддитивное производство широко применяется для изготовления изделий сложной геометрической формы с минимальными отходами материалов. Одной из перспективной технологией является метод проволочного электронно-лучевого аддитивного производства (ЭЛАП), который позволяет получать высококачественные изделия с низкодефектной структурой. Алюминиевые сплавы, используемые в аддитивном производстве для изготовления металлических изделий, представляют интерес за счет их высокой удельной прочности, позволяющей снизить вес детали, оптимальным механическим свойствам и невысокой стоимости переработки. Алюминиево-кремниевые сплавы AlSi12 обладают низкими коэффициентом теплового расширения, высокой коррозионной и износостойкостью. В данной работе экспериментально методами оптической, электронной и просвечивающей микроскопии исследована микроструктура эвтектического сплава AlSi12, изготовленного аддитивным послойным электронно-лучевым плавлением проволоки. Показано, что аддитивно изготовленный сплав AlSi12 представляет собой двухуровневый композит. Внутри каждого слоя образуются алюминиевые дендриты размером десятки микрон, окруженные эвтектическим каркасом. Эвтектика в свою очередь определяется на просвет как алюминиевая матрица с объемными равномерно распределенными частицами первичного кремния субмикронных размеров. На основе экспериментальных изображений построены модельные структуры различных масштабов: дендритные структуры с учетом и без учета прослойки, а также структура композиционного материала эвтектики. Динамические краевые задачи решаются с помощью программного пакета ABAQUS/Explicit методом конечных элементов. Для описания механической реакции кремния и алюминия используются изотропные модели упругости и упруго-пластичности с разрушением, соответственно. Реализован двухуровневый подход, при котором первоначально решается задача на микронном уровне о деформировании композита «алюминиевая матрица – частицы кремния», и путем осреднения по объему извлекаются эффективные свойства эвтектики. Затем эти свойства используются на уровне сотен микрон для исследования деформации и разрушения дендритных структур. Результаты моделирования показали, что в прослойке в области границы раздела с эвтектическим каркасом возникает высокая концентрация напряжений, которая вызывает локализацию пластического течения, раннее зарождение трещин, и понижение прочности дендритной структуры.

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

ЛЕДОВЫЕ КОМПОЗИТЫ, УПРОЧНЕННЫЕ ОРГАНИЧЕСКИМИ И НЕОРГАНИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ**В.М. Бузник, В.В. Родаев, А.А. Самодуров, В.М. Васюков, Д.Ю. Головин, С.С. Разливалова, А.И. Тюрин**Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Россия
tyurinalexander@yandex.ru

Экстенсивное освоение Арктики и регионов с холодным климатом, богатых различными природными ресурсами, требует большого количества дешевых экологически безопасных строительных материалов, предпочтительно с использованием местных возобновляемых источников. Лед, повсеместно доступный в этих регионах, отвечает всем вышеперечисленным критериям (он экологически безопасен, его источники возобновляемы, он не требует утилизации по окончании срока эксплуатации и т.д.), но имеет малую прочность, высокую хрупкость и склонность к ползучести. Для улучшения свойств льда известны технологии его упрочнения и создания ледовых композитов (ЛК) с использованием макроскопических и микроволоконистых добавок. Однако они не всегда технологичны, нуждаются в принятии специальных мер послышной укладки и заморозки макродобавок, борьбе с расслоениями, коагуляцией, захваченными пузырьками воздуха и другими факторами, экологически не безупречны и требуют специальных мер по утилизации после окончания жизненного цикла сооружения и т.д. При этом на настоящий момент установлено, что радикального упрочнения ЛК только с помощью макро- и микроразмерных армирующих добавок достичь невозможно. Этому препятствует низкая прочность самой матрицы ЛК - льда, какие бы высокопрочные армирующие элементы не применялись. Это закрывает путь к их широкому применению при использовании в Арктике и других холодных регионах (строительство зимних дорог, переправ, взлетно-посадочных полос, прибрежных разгрузочных площадок, помещений различного назначения и т.п.).

В этой работе описывается новый подход к упрочнению льда путем добавления органических и неорганических наночастиц (НЧ) размером 20-100 нм в замораживаемую воду, а также представлены экспериментальные результаты и анализ возможных механизмов упрочнения поликристаллического льда с использованием НЧ. В качестве типичных представителей таких добавок были выбраны НЧ целлюлозы и диоксида кремния. Обе добавки гидрофильны, экологически безопасны, широко распространены, дешевы и могут производиться из местного возобновляемого сырья. Показано, что добавление от 0,01 до 5 масс.% НЧ приводит к уменьшению среднего размера зерен ледового композита в $5,3 \pm 0,7$ раза и увеличению его прочности на сжатие в $2,5 \pm 0,3$ раза. Наибольшая чувствительность прочности льда к концентрации НЧ составляет от 0,1 до 1 масс.%. В этом диапазоне концентраций увеличение прочности обратно пропорционально корню квадратному из среднего размера зерна. Экспериментальные данные лучше соответствуют соотношению Гриффитса, чем соотношению Холла-Петча, что свидетельствует в пользу того, что прочность льда лимитируется трещинами, длина которых пропорциональна среднему размеру зерен.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00577,
<https://rscf.ru/project/22-19-00577/>.*

ДИСЛОКАЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ МИКРОПОР В ПРОФИЛИРОВАННОМ САПФИРЕ ПО ДАННЫМ ФАЗОВО-КОНТРАСТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ТОПОГРАФИИ В СИНХРОТРОННОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Ж.В. Гудкина^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
gudkinazhanna@mail.ru

Сапфир, выращенный из расплава в виде трубок, лент, стержней и других более сложных профилей, находит применение в медицине, оптике, фотонике, ядерной физике.

В кристаллической решетке сапфира можно выделить две структурные элементарные ячейки: гексагональную и ромбоэдрическую. Ленты, выращенные по методу Степанова таким образом, что их широкая боковая поверхность параллельна грани гексагональной призмы, обладают лучшим структурным совершенством, чем базисноограниченные ленты. Однако атомно-гладкая базисная грань не нуждается в дополнительной обработке. Поэтому ленты сапфира с поверхностью (0001) представляют практический интерес, в том числе в качестве подложек для микроэлектронных структур.

Механизмом образования дислокаций в сапфире является пластическая деформация под действием термоупругих напряжений. Поры, которые образуются в результате захвата газа расплавом на фронте роста кристалла, представляют собой пример концентраторов напряжений. Распространение дислокаций в основном происходит путем скольжения. В базисноограниченных лентах преобладает механизм скольжения дислокаций в призматических плоскостях. В результате в объеме лент формируется блочная структура. Преобладающая роль газовых пор как источников дислокаций была установлена методом рентгеновской дифракционной топографии (РДТ). Известно, что на топограмме изображение поры определяется упругими деформациями в окружающей пору части кристалла. При этом уже зародившиеся дислокации дают значительный вклад в контраст. Рентгеновская топограмма не выявляет истинные размеры и форму пор. До сих пор не установлено однозначное соответствие между размером газовых пор и их дислокационной активностью.

В данной работе применялись методы визуализации в когерентном синхротронном излучении (СИ) источника 3-го поколения. Помимо метода РДТ, был использован метод фазово-контрастного изображения (ФКИ) на просвет. Размеры сферических пор рассчитывались с помощью программы XRWP2 (X-ray Wave Propagation 2D), основанной на теории фазово-контрастного изображения 3D объектов.

Методы визуализации с использованием СИ выявляют газовые микропоры и дислокации в профилированных кристаллах сапфира. Сравнив изображения, полученные методами РДТ и ФКИ, можно сделать вывод, что микропоры являются источниками дислокаций. В результате определения диаметров микропор путем моделирования фазово-контрастных изображений установлено, что дислокационная активность поры не коррелирует с ее диаметром. Рассмотрены подходы для оценки критического напряжения, необходимого для выброса дислокаций из ограниченных пор, под действием термонапряжений в растущих кристаллах сапфира.

ВОДОРОДНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Fe₂₀Cr₂₀Ni₂₀Mn₂₀Co_{19,2}N_{0,8} ПОДВЕРГНУТОГО СТАРЕНИЮ

Д.Ю. Гуртова, Д.О. Астапов, Е.Г. Астафурова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск

dasha_gurtova@mail.ru

В настоящей работе с использованием методов оптической металлографии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, а также одноосного статического растяжения исследовано влияние частиц вторичной фазы Cr₂N, выделившихся в результате старения, на водородное охрупчивание многокомпонентного сплава Fe₂₀Cr₂₀Ni₂₀Mn₂₀Co_{19,2}N_{0,8} (ВЭС) (ат. %). Термомеханическая обработка (ТМО) литого сплава заключалась в горячей ковке при температуре 1230°C и отжиге при температуре 1200°C в течение 2 ч с последующей закалкой в воду (ВЭС-1). После ТМО часть образцов подверглась старению при температуре 900°C в течение 1 ч (ВЭС-2). Часть литых заготовок подверглись отжигу при температуре 1200°C в течение 2 ч, холодной прокатке до 80% и последующему отжигу при температуре 900°C в течение 1 ч (ВЭС-3). Электролитическое насыщение образцов водородом осуществлялось в течение 50 ч при плотности тока 10 мА/см² и комнатной температуре в 3 % водном растворе NaCl, содержащим 3 г/л NH₄SCN.

Методами электронной микроскопии установлено, что образцы ВЭС-1 обладают однофазной крупнозернистой ($d=221\pm 97$ мкм) аустенитной структурой, тогда как в остальных представленных образцах наблюдается формирование частиц вторичной фазы: старение по выбранным режимам приводит к образованию пластинчатых частиц Cr₂N по границам зерен в крупнокристаллических образцах ВЭС-2 ($d=177\pm 39$ мкм) и однородно распределенных равноосных частиц той же фазы ($d_r=132\pm 32$ нм) в образцах ВЭС-3, характеризующихся мелкокристаллической структурой ($d=6\pm 4$ мкм).

Механические свойства образцов ВЭС-1 и ВЭС-2 близки ($\sigma_{0,2}^{ВЭС-1}=254\pm 5$ МПа, $\sigma_{0,2}^{ВЭС-2}=261\pm 5$ МПа, $\delta^{ВЭС-1}=66\pm 2$ %, $\delta^{ВЭС-2}=63\pm 2$ %), при этом для образцов ВЭС-3 наблюдается резкое увеличение предела текучести ($\sigma_{0,2}^{ВЭС-3}=395\pm 5$ МПа), обусловленное дисперсионным и зернограницным упрочнениями. Наводороживание слабо влияет на предел текучести образцов ($\Delta\sigma_{0,2}^{ВЭС-1}=7$ МПа, $\Delta\sigma_{0,2}^{ВЭС-2}=11$ МПа, $\Delta\sigma_{0,2}^{ВЭС-3}=4$ МПа), однако приводит к снижению предела прочности и удлинения до разрушения. Коэффициент водородного охрупчивания K_H , характеризующий потерю пластичности, вызванную водородом, равен 14 % для образцов ВЭС-1 и снижается до 2 % и 11 % для образцов ВЭС-2 и ВЭС-3, соответственно. Насыщение всех образцов исследуемого сплава водородом способствует формированию хрупкого поверхностного слоя, толщина которого в образцах ВЭС-1 составляет $D_{ВЭС-1}=38\pm 12$ мкм и уменьшается в состаренных образцах ВЭС-2 и ВЭС-3 ($D_{ВЭС-2}=28\pm 9$ мкм, $D_{ВЭС-3}=29\pm 5$ мкм).

Таким образом показано, что выделение частиц Cr₂N вне зависимости от их морфологии и распределения приводит к уменьшению толщины хрупкого индуцированного водородом слоя и увеличению стойкости высокоэнтропийного сплава Fe₂₀Cr₂₀Ni₂₀Mn₂₀Co_{19,2}N_{0,8} к водородной хрупкости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00261, <https://rscf.ru/project/20-19-00261/>. Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

ВЛИЯНИЕ ВИДА ТЕРМОСИЛОВОЙ ТРАЕКТОРИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ НА РОСТ НЕОБРАТИМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В НИКЕЛИДЕ ТИТАНА

Н.П. Богданов¹, М.Ю. Дёмина²

¹ Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

² Высшая школа технологий и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия
mdemina59@mail.ru

В процессе термоциклирования изделий из материалов, обладающих эффектом памяти формы через интервалы мартенситных переходов в нагруженном состоянии, накапливаются заметные необратимые деформации. Как правило, необратимые деформации являются не желательными, и ухудшающими размерную стабильность материалов СПФ. Однако необратимая деформация может рассматриваться как эффективный инструмент для создания низкотемпературной технологии задания исходной формы изделиям из сплава Ti–Ni. В этом случае анализ влияния траекторий термомеханического воздействия, при которых реализуется аномальный рост необратимых деформаций в сплавах Ti–Ni, является актуальной задачей.

В данной работе объектами экспериментальных исследований являлись образцы из никелида титана марки ТН–1, по составу близкому к эквиатомному, имеющие форму сплошного цилиндра с характеристическими температурами мартенситных переходов $M_H = 350$ К, $M_K = 310$ К, $A_H = 370$ К, $A_K = 420$ К.

Экспериментально реализовались три возможных траектории термосилового воздействия на сплавы Ti–Ni, при которых наблюдался аномальный рост необратимых деформаций: 1) термоциклирование через интервалы мартенситных переходов в условиях кручения под постоянным напряжением на этапах нагревания τ_n и охлаждения τ_0 , т.е. $\tau_n = \tau_0$; 2) нагружение образца в мартенситном состоянии с последующим нагревом через интервалы мартенситных переходов до аустенитного под заданным напряжением $\tau_n = \tau$, а затем разгрузка до $\tau_0 = 0$ и охлаждение до мартенситного состояния; 3) нагрузка образца в аустенитном состоянии до постоянного уровня напряжений с последующим охлаждением под заданным напряжением $\tau_0 = \tau$, разгрузкой до мартенситного состояния и нагреванием без нагрузки $\tau_n = 0$.

В процессе i -го термоцикла под нагрузкой накапливается весьма существенная необратимая деформация, которую представляли в виде разности обратимых ее составляющих на этапах охлаждения и нагревания, а итоговую необратимую деформацию за несколько термоциклов суммировали.

Сравнение деформационных откликов по необратимой и обратимой составляющим деформаций первого и второго режимов показывает, что во втором режиме термоциклирования деформации несколько ниже, чем в первом режиме, и составляют $80\% \div 100\%$ исходной величины. Деформационные отклики в третьем режиме выше, чем в первом режиме для начальных циклов в 2,0 – 2,5 раз; а в установившихся циклах примерно в 2,0 раза и увеличивались за цикл, в зависимости от уровня напряжений, от 11% до 34%.

Анализ влияния траекторий термомеханического воздействия, при которых реализуется аномальный рост необратимых деформаций в сплавах Ti–Ni, показал, что наиболее эффективным является режим охлаждения под нагрузкой с последующим нагреванием в ненагруженном состоянии.

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1570С, ПОДВЕРГНУТОГО ВСЕСТОРОННЕЙ КОВКЕ И КРИОГЕННОЙ ПРОКАТКЕ

Р.Р. Загитов, О.Ш. Ситдиков, Е.В. Автократова, С.В. Крымский, В.В. Терешкин, О.Э. Латыпова, М.В. Маркушев

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия
Zagitov-rinat@mail.ru

Исследовали влияние термомеханической обработки, включающей всестороннюю изотермическую ковку при 325°C до истинной деформации около 12 и последующую изотермическую криогенную прокатку при -196°C с обжатием от 30 до 90%, на структуру и механические свойства сплава 1570С (Al-5,0Mg-0,18Mn-0,2Sc-0,08Zr-0,01Fe-0,01Si, вес. %).

После гомогенизации слитка сплава при температуре 360°C в течение 6 часов его структура состояла из равноосных зерен размером около 25 мкм, в теле которых были сравнительно однородно распределены наноразмерные когерентные выделения $Al_3(Sc,Zr)$, так называемые дисперсоиды. Сплав в этом структурном состоянии демонстрировал предел текучести 245 МПа, предел прочности 355 МПа при относительном удлинении 26%.

В результате всесторонней ковки в сплаве сформировалась относительно однородная (ультра)мелкозернистая структура с преимущественно равномерным распределением наноразмерных когерентных дисперсоидов $Al_3(Sc,Zr)$. Размер зерен/субзерен (D/d) матрицы составлял 2,2/1,9 мкм, а плотность дислокаций $5,0 \times 10^{12} \text{ м}^{-2}$. Механические свойства сплава после ковки были следующими: предел текучести - 235 МПа, предел прочности - 365 МПа, относительное удлинение - около 37%.

Криогенная прокатка привела к увеличению долевого размера зерен вследствие их вытягивания, а также к их фрагментации за счет формирования полосовых субструктур с высокой плотностью дислокаций. При обжатии 90% средние размеры зерен и субзерен в плоскости прокатки составили 2,9/1,1 мкм соответственно, а плотность дислокаций увеличилась до $9,0 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$. В результате формирования такой нагартованной (ультра)мелкозернистой структуры, содержащей дисперсоиды нанометрического размера, был достигнут уникальный для промышленных термонеупрочняемых алюминиевых сплавов баланс прочности и пластичности при комнатной температуре. Так, после криогенной прокатки с 90%-ным обжатием был получен предел текучести сплава равный 590 МПа, предел прочности при растяжении - 620 МПа при относительном удлинении около 9%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00702 <https://rscf.ru/project/23-19-00702>. Работы проводились на базе Центра коллективного пользования ИМСП РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**П.В. Исхакова, С.В. Колосов, С.А. Баранникова**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
bsa@ispms.ru

Разработка новых конструкционных материалов, предназначенных для использования в условиях низких температур, обуславливает острую необходимость в развитии расчётных и экспериментальных методов оценки несущей способности. Базой для таких расчетов традиционно являются сведения о комплексе механических свойств и их поведения при изменении внешних факторов (температура, вид и скорость нагружения). Большинство эффектов влияния температуры на характеристики деформации и разрушения металлов объясняются температурной зависимостью напряжения, необходимого для преодоления дислокациями препятствий. Сложность макроскопического поведения пластически деформируемых твердых тел связана с тем, что ансамбль взаимодействующих дислокаций представляет собой пример нелинейной диссипативной системы. Таким образом, возникает потребность в проведении комплексных исследований крупномасштабных проявлений самоорганизации в рамках классических и нетрадиционных экспериментальных и теоретических подходов. И для полного понимания деформационного поведения необходимы сведения о закономерностях автоволн локализации пластической деформации металлов.

Настоящая работа посвящена исследованию макроскопической локализации пластической деформации в температурном интервале $173\text{ K} < T < 297\text{ K}$. Механические испытания на одноосное растяжение проводили на плоских образцах сплава А5М (содержание Al – не менее 99,5 масс.%) с размером зерна 10,5 мкм при постоянной скорости движения подвижного захвата испытательной машины «Instron-1185». Температуру поддерживали постоянной с помощью непрерывной подачи паров азота из сосуда Дьюара в рабочую камеру. Анализ распределений локальных деформаций в процессе нагружения проводили методом двухэкспозиционной спекл-фотографии.

Деформационные кривые исследуемого сплава относятся к диаграммам параболического типа, что объясняется балансом процессов накопления дислокаций при их взаимодействии с «лесом» и аннигиляции дислокаций путем поперечного скольжения в ГЦК поликристаллах при низких и умеренных температурах. Влияние температуры и общей деформации на степень однородности распределений локальных деформаций оценивали по величине коэффициента вариации. С ростом общей деформации и понижением температуры распределение локальных деформаций становится более неоднородным. Картина локализации деформации представляет собой стационарную систему эквидистантных очагов локализованной пластичности (диссипативная структура). Оценка кумулятивной вероятности характеристик локализованной пластичности проводилась с использованием двухпараметрического распределения Вейбулла. Пространственный период оценивали, как среднее расстояние между соседними очагами деформации, используя хронограммы $X-t$, где X – координата очага локальной деформации, t – время. Установлен экспоненциальный характер температурной зависимости пространственного периода локализации деформации.

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

ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВЫХ СИЛОВЫХ ПУЧКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ОБРАТИМОЙ ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

А.Ю. Киселев¹, Л.С. Метлов², Г.А. Волков³, Ю.Н. Вьюненко⁴

¹АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург, Россия

²ГБУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк, Россия

³Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД», Санкт-Петербург, Россия
aleyukiselev@gmail.com

Для расширения сферы технического применения кольцевых силовых пучковых элементов (КСПЭ) проведены исследования их формоизменения в режиме развития обратимой памяти формы (ОПФ) при термоциклировании с переводом материала КСПЭ из низкотемпературной мартенситной фазы в аустенитную и обратно. Образцы были изготовлены из проволоки сплава Ti-Ni 55,16 вес % диаметром 2 мм. Конструкция исследованных силовых элементов представляет собой бухту из 6 витков проволоки. В исходном состоянии КСПЭ имели форму окружности диаметром 60 мм. Для замыкания контура бухты применено цепное соединение.

Деформирование КСПЭ проводили в гетерофазном состоянии материала на стадии охлаждения. В этих условиях у никелида титана проявляется пластичность превращения, что позволяет добиваться значительных изменений геометрических параметров образцов при относительно малых силовых воздействиях на них. Для осуществления такой термомеханической обработки (ТМО) силовых элементов использован специальный динамометр ЛИНД. Задавали начальное силовое воздействие на пару КСПЭ контртелом в виде спиральной пружины. Это приводило во время формоизменения силовых элементов к плавному уменьшению силового воздействия на них в процессе остывания.

Проведены две серии многократного термоциклирования КСПЭ с нагревом в свободном состоянии и охлаждением из аустенитной фазы под нагрузкой. Начальные усилия, воздействующие на образцы при температуре выше A_c , были равны 200Н и 400Н. Характеристическим параметром конструкции, за которым велось наблюдение, было выбрано максимальное расстояние между точками контура бухты. Определяли его изменение в режимах развития ЭПФ и ОПФ.

После первого термоцикла с охлаждением образцов под нагрузкой характеристики формоизменения за счёт ОПФ составили ~15% от аналогичной величины, полученной в результате развития ЭПФ. С ростом числа термоциклов эта разница уменьшалась. При этом до 10 термоцикла нагрузка в 400Н обеспечивала более высокие значения характеристик формоизменения и условий развития ЭПФ и в режиме ОПФ. Дальнейшее термоциклирование привело к тому, что изменения геометрических параметров образцов под воздействием двух силовых режимов стали сближаться. При этом формоизменение КСПЭ за счёт ОПФ после 25 термоциклов превысило отметку в 60% от величины, обусловленной ЭПФ.

На образцах, прошедших ТМО с силовым воздействием в 200Н, исследована стабильность изменения геометрических параметров в режиме развития ОПФ. Проведено 150 циклов перевода силовых элементов из мартенситного состояния в аустенитное и обратно без нагружения. Измерения параметров формоизменения показали незначительность отклонения их величины от первоначальных значений.

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА ЛС59-1 В ПРОЦЕССЕ ВСЕСТОРОННЕЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ КОВКИ

М.С. Кищик, А.Д. Котов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Российская Федерация
kishchik.ms@misis.ru

На сегодняшний день большое внимание уделяется научным исследованиям, направленным на улучшение характеристик уже известных промышленных сплавов. Один из самых распространенных в промышленности медно-цинковых сплавов - латунь ЛС59-1, обладающая высокой прочностью, отличной обрабатываемостью и устойчивостью к коррозии. Этот сплав широко применяется в изготовлении различных деталей, особенно в сферах машиностроения и производства электрических установок. Его использование распространено при производстве прутков, полос, лент, проволоки, антифрикционных материалов и в часовом производстве.

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) является эффективным способом получения мелкозернистой структуры. Основные преимущества ИПД – возможность получения ультрамелкозернистой структуры с преимущественно высокоугловыми границами, однородность во всём объеме материала, и, как следствие, отсутствие анизотропии свойств с сохранением исходной геометрии.

Всесторонняя изотермическая ковка (ВИК) – вид ИПД, позволяющий получать ультрамелкозернистую структуру в массивных, промышленно значимых образцах. За счет многократного повторения ковочного цикла с постоянной сменной оси деформации удается эффективно проработать весь объем материала и сохранять исходные размеры деформируемого образца. За счет жесткой деформационной схемы данный метод позволяет накопить высокую степень деформации даже хрупких материалах.

Целью данной работы является исследование влияния всесторонней изотермической ковки на структуру и свойства промышленной свинцовой латуни ЛС59-1.

В работе проведен анализ эволюции структуры сплава системы Cu-Zn-Pb после всесторонней изотермической ковки в интервале температур 400 – 500 °С и накопленной степени деформации 7,2 – 14,4. Выявлено формирование ультрамелкозернистой микроструктуры с зерном 2 мкм после ВИК при 400 °С. Показано, что ИПД при температуре ниже β-трансуса не приводит к охрупчиванию материала и позволяет увеличить твердость с 250 ед. HV (ВИК при 500 °С) до 325 ед. HV (ВИК при 400 °С).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-79-01080.

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ СПЛАВОВ Al-Mg-Mn С ДОБАВКАМИ Ni И Fe

А.А. Кищик, О.А. Яковцева, М.С. Кищик, А.В. Михайловская
Университет науки и технологий, Москва, Россия
kishchik.aa@misis.ru

Сверхпластическая формовка (СПФ) при повышенных температурах позволяет получать геометрически сложные изделия высокого качества из сплавов на различных основах. Большинство промышленных алюминиевых сплавов являются сверхпластичными в диапазоне скоростей деформации 10^{-4} – 10^{-3} с⁻¹ при относительном удлинении 200-400%. Для значительного увеличения производительности формования сверхпластичных листов и повышения экономической эффективности способа требуются сверхпластичные сплавы со скоростями 10^{-2} с⁻¹ и выше. Увеличение скорости сверхпластической деформации возможно за счет уменьшения размера рекристаллизованного зерна. В настоящей работе было изучено влияние эвтектикообразующих Fe и Ni и дисперсоидообразующих элементов Mn и Cr на микроструктуру и показатели сверхпластичности магния Al - 4,8 % Mg с целью получения сверхпластичных листов при повышенных скоростях деформации, а также изучена возможность уменьшения размера зерна методом трения с перемешиванием (ОТП).

Перед сверхпластической деформацией новый сплав имеет гетерогенную структуру с частицами разного размера и стабильное зерно размером $4,8 \pm 0,4$ мкм. Крупные частицы фазы Al₉FeNi выступают в качестве подложки для зарождения новых зерен при рекристаллизационном отжиге, а дисперсоиды фазы Al₆(Mn,Cr) эффективно сдерживают рост новообразованных зерен, что хорошо стабилизирует структуру в процессе СПФ.

Показатели сверхпластичности нового сплава превышают значения сплавов системы Al-Mg AA5083 и Alnovi-U, используемых в настоящее время для сверхпластической формовки. Максимальное удлинение нового сплава достигает 600% при низких скоростях деформации, однако такие удлинения позволяют получать детали очень сложной геометрической формы и с выраженным рельефом. При постоянной скорости деформации около 10^{-2} с⁻¹ относительное удлинение достигает 300%, что позволяет за короткое время получать практически весь ассортимент выпускаемой в настоящее время продукции. Механические свойства сплава при комнатной температуре на 15% превышают предел текучести используемых в настоящее время промышленных сплавов.

Для получения более мелкозернистой структуры был использован метод ОТП, который эффективно измельчает микроструктуру сплавов. Анализ структуры после ОТП показал недостаточную термостабильность, сразу после обработки средний размер зерен не более 4 мкм, однако при нагреве он резко увеличивается, что снижает показатели СПД, относительное удлинение не превышает 100%. Если после ОТП ввести дополнительную холодную прокатку, стабильность зерен повышается. Размер зерен увеличивается до 10 мкм при нагреве до 500°C, что позволяет получать детали методом СПФ.

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ №22-79-00215, <https://rscf.ru/project/22-79-00215/>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТОНКИХ ПРОВОДОВ ИЗ СПЛАВОВ Al-Zr

А.В. Комельков, А.В. Нохрин, А.А. Бобров

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
Robot112018@mail.ru

Целью работы является разработка проводниковых алюминиевых сплавов, которые могут быть использованы для изготовления тонких авиационных проводов с повышенной термической стабильностью зеренной структуры и механических свойств.

В работе исследуются тонкие провода \varnothing 0.3 мм из сплавов Al-(0.25-0.4)вес.%Zr, изготовленные методом ротационнойковки слитков и последующего волочения. Исследована прочность на растяжение, удельное электросопротивление (УЭС) и твердость проводов в исходном состоянии и после испытаний на термостойкость в соответствии с ГОСТ Р МЭК 62004-2014. Проведено исследование микроструктуры проводов и фрактография изломов.

Провода в исходном состоянии имеют предел прочности более 200 МПа, УЭС менее 3.4 мкОм·см. Провода выдержали испытания на термостойкость по ГОСТ Р МЭК 62004-2014 при температурах 230 и 280 °С, которые моделировали длительную (350400 ч) эксплуатацию при 150 и 210 °С, соответственно. Тем не менее анализ полученных результатов показывает, что выделяющиеся в сплавах вторичные частицы Al_3Zr не позволяют в достаточной степени обеспечить стабильность неравновесной мелкозернистой структуры алюминиевого провода, что, по-видимому, связано с высокой температурой начала интенсивного распада твердого раствора Al-Zr, превышающей температуру рекристаллизации сплава. Вторым фактором может быть малая объемная доля образующихся вторичных частиц, так как значительная часть Zr, выделяющегося при старении, расходуется на увеличение размера крупных интерметаллидов Al-Zr, образовавшихся на этапе кристаллизации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №20-19-00672).

Авторы благодарят Коткова Д.Н. (ННГУ) за проведение работ по ротационнойковке алюминиевых сплавов и Сысоева А.Н. (ННГУ) за помощь в проведении экспериментов по растяжению проводов.

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Д.А. Конотоп¹, П.В. Максимов²

¹ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

²Пермский научно-исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
konotopda@gmail.com

В данной работе представлены результаты исследования по разработке и анализу математических моделей инерциальных измерительных устройств. Основная цель работы заключается в создании математических моделей для комплексного анализа этих устройств, разработке методик их численной реализации, а также проведении вычислительных экспериментов для изучения статического и динамического деформированного состояния.

В ходе работы были получены уравнения движения чувствительного элемента маятникового компенсационного акселерометра для трех степеней свободы. Была реализована полная схематехническая модель усилителя отрицательной обратной связи в пакете Matlab Simulink, а также полная электромеханическая 1D-модель системы с замкнутым контуром.

Одним из ключевых результатов работы является разработка подхода к получению передаточной функции акселерометра на основе упрощенной имитационной 1D-модели. Это позволяет инженерам анализировать всю измерительную систему без применения сложного математического аппарата.

В работе также представлена методика определения физических характеристик имитационной модели, включая коэффициенты жесткости, демпфирования и массо-инерционные характеристики. Эти методы были верифицированы путем сравнения полученных данных с экспериментальными.

Разработанная модель используется на предприятии ПАО «ПНППК» для анализа конструкции и электрической схемы усилителя с целью его перевода на российскую элементную базу в рамках импортозамещения.

Важность этой работы не может быть недооценена, учитывая текущую потребность в точных и надежных инерциальных измерительных устройствах. Результаты этой работы могут быть применены для улучшения существующих устройств и разработки новых. Кроме того, они могут быть полезны для исследователей и инженеров, работающих в этой области, и могут служить основой для дальнейших исследований.

ЭФФЕКТ КРИОПРОКАТКИ НА МЕЖКРИСТАЛЛИТНУЮ КОРРОЗИЮ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1965

С.В. Крымский, Е.В. Автократова, В.В. Терешкин, О.Ш. Ситдиков, М.В. Маркушев
Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, Россия
mvmark@imsp.ru

Исследовали влияние низкотемпературной термомеханической обработки, обеспечивающей структурное и дисперсионное упрочнение, на сопротивление межкристаллитной коррозии (МКК) промышленного алюминиевого сплава 1965 стандартного химического состава. Гомогенизированный крупнозернистый слиток и мелкозернистую поковку (с размером зерна 20 и 6 мкм соответственно) закаливали в воду с 460 °С, затем прокатывали в изотермических условиях при температуре жидкого азота до суммарных степеней деформации в интервале $\epsilon \sim 0,4 \dots 1,25$, и/или подвергали старению при комнатной температуре в течение 6 суток. Качественную и количественную оценку сопротивления сплава МКК проводили с учетом требований ГОСТ 9.021-74. Для этого пластины с размерами 30 × 10 × 1 мм перед испытаниями покрывали коррозионно-стойким лаком со всех сторон, кроме одной торцевой, предназначенной для контакта с агрессивной средой. Образцы выдерживали при комнатной температуре в течение 24 часов в 3% водном растворе хлорида натрия (NaCl) + 1% соляной кислоты (HCl). Вид и форму коррозионных поражений исследовали с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов. Оценивали глубину и интенсивность поражения вдоль всей контактной поверхности.

Обнаружено, что коррозия обоих состояний сплава без прокатки, т.е. после закалки и естественного старения, имела явно выраженный межкристаллитный характер. Общая глубина поражения слитка, с учетом его локализованной части, была на треть больше, чем поковки. Криогенная прокатка до $\epsilon \sim 0,4$ существенно не изменила вид и параметры МКК слитка, кроме незначительного уменьшения глубины его равномерного поражения. А с ростом степени деформации при прокатке до $\epsilon \sim 1,25$ глубина как равномерного, так и локального поражения уменьшилась почти в два раза. При этом вид и форма очагов повторяли форму и размер зерен, свидетельствуя о межзеренном характере коррозионного повреждения, интенсивность которого достигала 100%. В то же время криопротатка поковки, вне зависимости от суммарного обжатия, приводила почти к двукратному уменьшению глубины и равномерного, и локализованного поражения, причем при той же интенсивности коррозии. При этом межкристаллитный характер очагов практически отсутствовал даже после прокатки до минимальной исследованной степени.

Обсуждены данные качественного и количественного анализа сопротивления сплава МКК и природа его поведения. Сделан вывод о том, что различия в поведении сплава в аттестованных исходных состояниях были, прежде всего, обусловлены более мелкозернистой структурой поковки, а также устранением при предварительной ковке слитка непрерывной сетки приграничных зон, свободных от выделений алюминидов Sc и Zr, формирующейся при его гомогенизации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00702 <https://rscf.ru/project/23-19-00702/>. Работы проводились на базе Центра коллективного пользования ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КРИТИЧНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПО ДАННЫМ ЛИНЕЙНОЙ ЛОКАЦИИ И ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА МОЩНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ПРИМЕРЕ СТАЛИ ЗПС

А.М. Лексовский¹, Б.Л. Баскин¹, В.Р. Ржевкин², П.Н. Якушев¹, Г.В. Ваганов³,
Ш.Ш. Азимов⁴, Л.В. Тихонова¹, М.Ф. Киреевко¹

¹Физико-технический институт им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²ООО ДИАПАК, Москва, Россия

³Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Физико-технический институт им. Умарова ТАН, Душанбе, Таджикистан
a.leks2007@mail.ru

Ранее проведенное в SEM *in situ* изучение длительного стационарного роста магистральной трещины в образцах модельного "бесструктурного" материала типа ероху resin выявило диалектическую роль взрывообразно рождающихся микротрещин в формировании пластической зоны в энерго-диссипативном процессе разрушения.

Для изучения *in situ* процесса формирования критичности пластической деформации в металлах в работе использовалась многоканальная система "DISP", построенная на базе цифровых сигнальных процессоров. DISP позволяет регистрировать и обрабатывать параметры сигналов АЭ со скоростью 132 Mb s⁻¹.

Программное обеспечение AEWin со встроенным быстрым Фурье преобразованием позволяет получать в области (195.313 ÷ 996.094) kHz графики частотных спектров в 4-х диапазонах и отображать их в реальном времени работы.

На стадиях упругости, текучести и начала упрочнения на фоне быстрого накопления АЕ energy наблюдается эволюция её составляющих, характеризуемых – синхронизацией и противофазностью спектральной мощности низкочастотных каналов F1(t) и F2(t) и медианной частоты f_{med}(t); частоты пика мощности (t), длительности импульса (t). Но начиная с точки/области бифуркации на диаграмме деформирования темп накопления АЕ energy /потенциальной энергии начинает резко замедляться и асимптотически затухает. Это свидетельствует не только о достижении "предельного" уровня внутренних напряжений, но и о сокращении степени свободы локальных перестроек, т.е. диссипативной способности. На этапе асимптотического затухания накопленный уровень потенциальной энергии, как показывает измерение постфактум микротвердости HV, достигает для данных условий эксперимента достаточно высокого значения (1.6 ÷ 1.8) GPa по сравнению с 1.21 GPa в исходном состоянии, но не так велик, чтобы образовать трещину Гриффитса. Энергии теплового движения при этом может быть вполне достаточно, чтобы спровоцировать переползание одной-двух дислокационных петель поверх такого барьера, после чего срабатывает механизм "застежки молния". Именно на этом этапе асимптотического затухания накопления потенциальной энергии стабильный тренд роста спектральной мощности каналов F1(t) и F2(t), медианной частоты f_{med}(t) и частоты пика мощности (t) прерывается серией "осцилляций" падения при синхронном подъеме длительности импульса, т.е. потерей устойчивости деформирования.

В итоге, затухание накопления АЕ energy, являясь графиком исчерпания энергоёмкости/диссипативной способности, - и есть процесс формирования критичности пластической деформации твердого тела.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ МИКРОНАПРЯЖЕНИЙ НА СКЛОННОСТЬ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ К ЗАМЕДЛЕННОМУ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ

Н.О. Ливанова¹, Г.А. Филиппов¹, Н.А. Демиров²

¹ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва, Россия

²ОИВТ РАН, г. Москва, Россия

iqs12@yandex.ru

Одной из причин преждевременного хрупкого разрушения стальных изделий, изготовленных из непрерывнолитой заготовки, является неоднородность состава и структуры, наследуемой при последующих переделах литой заготовки. Особенно это характерно для изделий из высокоуглеродистых сталей, для которых характерна ликвация по углероду и, как следствие, образование мартенситной структуры при охлаждении. При этом хрупкое разрушение может происходить при низких напряжениях, а иногда при вылеживании без внешней нагрузки вследствие развития явления замедленного хрупкого разрушения (ЗХР). К таким изделиям относятся железнодорожные рельсы и колеса.

В работе исследовано влияние остаточных микронапряжений на склонность к замедленному разрушению. Исследования колесной высокоуглеродистой стали с различным содержанием углерода показали, что ширина рентгеновской интерференционной линии, а также величина искажений кристаллической решетки практически не изменяются по глубине обода колес. Слабая зависимость ширины рентгеновской линии от содержания углерода в стали на всех расстояниях от поверхности, предположительно, связана с особенностями структуры стали с содержанием углерода 0,53%, включающей продукты промежуточного превращения.

В рамках лабораторного эксперимента сравнивали уровень остаточных микронапряжений в ободьях реальных колес с остаточными микронапряжениями в закаленной на мартенсит стали. Установлены минимальные, максимальные и средние значения локальных микронапряжений, которые могут вызвать замедленное разрушение, после закалки и низкого отпуска при 100 °С и в реальных колесах. Установлено, что уровень локальных микронапряжений в реальных колесах значительно ниже, чем в закаленной и отпущенной на 100 °С стали, склонной к ЗХР.

Анализ полученных результатов показал, что уровень остаточных микронапряжений даже после отпуска при 500 °С в реальных колесах повышенной твердости значительно ниже, чем после закалки и отпуска при этой температуре. Уровень остаточных микронапряжений 2-ого рода в реальной колесной стали, подвергнутой отпуску 500 °С, практически такой же как в колесной стали после закалки и отпуска при этой температуре. Для стали со структурой мартенсита уменьшение скорости нагружения снижает суммарную работу разрушения почти в два раза, а для низкоотпущенного мартенсита на 33%.

Таким образом, из полученных данных следует, что колесная сталь со структурой закаленного и низкоотпущенного мартенсита склонна к ЗХР, что является следствием высокого уровня остаточных микронапряжений, возникающих в результате сдвигового характера мартенситного превращения. Показано, что высокоуглеродистая рельсовая сталь, также как колесная, в закаленном состоянии обладает высокой склонностью к ЗХР.

МИКРОСТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СРЕДНЕЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$, ЛЕГИРОВАННОГО АЗОТОМ

А.В. Лучин, Д.Ю. Гуртова, Е.Г. Астафурова

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия
luchin250398@yandex.ru

В данной работе методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и испытания на одноосное статическое растяжение исследованы микроструктура, фазовый состав и механические свойства многокомпонентных среднеэнтропийных сплавов $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$, $(\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10})_{99,4}(\text{N})_{0,6}$ и $(\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10})_{98,8}(\text{N})_{1,2}$. Слитки выплавлены в вакуумной дуговой печи в атмосфере аргона. Для получения однофазной крупнозернистой структуры образцы подвергались гомогенизации путём отжига при температуре 1200°C в течение 2 ч, холодной прокатки до 80% обжатия и заключительного отжига при температуре 1200°C в течение 2 ч с закалкой в воду. Микроструктура полученных после обработки образцов исследована методом сканирующей электронной микроскопии в режиме дифракции обратнорассеянных электронов (ДОЭ). Для изучения фазового состава образцов проведен рентгеноструктурный анализ в $\text{Co-K}\alpha$ излучении в интервале углов $2\theta = 40 \div 120^\circ$. Механические свойства изучали при одноосном растяжении с начальной скоростью деформации $5 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре. Микромеханизмы разрушения исследовали с помощью методов растровой электронной микроскопии.

Гомогенизация, согласно результатам ДОЭ-анализа, привела к формированию во всех сплавах однофазной крупнокристаллической структуры со средними размерами зерен 151 мкм, 174 мкм и 180 мкм для $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$, $(\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10})_{99,4}(\text{N})_{0,6}$ и $(\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10})_{98,8}(\text{N})_{1,2}$, соответственно. Как рентгеноструктурный анализ, так и электронно-микроскопические исследования указывают, что во всех гомогенизированных сплавах образовалась аустенитная структура (ГЦК).

Установлено, что при легировании среднеэнтропийного сплава $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ азотом происходит повышение его механических характеристик при комнатной температуре за счет твердорастворного упрочнения. Легирование сплава $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ азотом обеспечило существенное повышение его предела текучести ($\sigma_{0,2}^{0\text{N}} = 180 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2}^{0,6\text{N}} = 260 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2}^{1,2\text{N}} = 270 \text{ МПа}$) и предела прочности ($\sigma_{\text{B}}^{0\text{N}} = 500 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{B}}^{0,6\text{N}} = 590 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{B}}^{1,2\text{N}} = 610 \text{ МПа}$). С увеличением концентрации азота в твердом растворе аустенитной фазы произошло падение пластичности сплава (удлинение $\delta^{0\text{N}} = 80 \%$, $\delta^{0,6\text{N}} = 74 \%$, $\delta^{1,2\text{N}} = 65 \%$). Несмотря на это, исследование структуры изломов показало, что во всех исследуемых сплавах разрушение носит преимущественно вязкий транскристаллитный характер, а на поверхностях излома наблюдается характерный ямочный рельеф. В работе обсуждаются механизмы деформации исследуемых сплавов и их влияние на деформационное поведение и разрушение материалов при растяжении.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00261, <https://rscf.ru/project/20-19-00261/>. Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА НЕУПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛАХ**В.В. Малашенко^{1,2}, Т.И. Малашенко³**¹*Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Россия*²*Донецкий государственный университет, Донецк, Россия*³*Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия*

malashenko@donfti.ru

Изучение взаимодействия водорода с металлами представляет интерес как с научной, так и с практической точки зрения. Наличие водорода в металлах может приводить как к отрицательным последствиям (водородное охрупчивание, водородное растрескивание и индуцированное водородом разрушение), так и положительным (пластифицирование металлов). При этом водород способен влиять на свойства металлов при концентрации порядка сотых долей процента. Существует, однако, весьма интересная, но недостаточно изученная область взаимодействия атомов водорода с дефектами кристалла, а именно – область высокоскоростной деформации наводороженных металлов, в которых концентрация водорода может достигать весьма больших значений. К таким металлам относятся палладий, который наиболее часто используется в качестве модельного металла при изучении взаимодействия с водородом, а также ванадий, ниобий, тантал и ряд других металлов. Высокоскоростная деформация реализуется как при изготовлении металлических деталей (ковка, штамповка, резка, динамическое канально-угловое прессование), так и при эксплуатации в условиях высокоэнергетических внешних воздействий. Механизм диссипации в условиях высокоскоростной деформации заключается в необратимом переходе энергии внешних воздействий в энергию поперечных колебаний дислокации в плоскости скольжения. Эффективность этого механизма определяется видом спектра дислокационных колебаний, прежде всего наличием в нём щели и её величиной. Спектральная щель формируется в результате коллективного воздействия на движущуюся дислокацию атомов водорода или других дислокаций. Чаще всего водород локализуется в междоузлиях металлической матрицы, что приводит к возникновению дополнительных упругих напряжений. При высоких концентрациях эти напряжения могут быть весьма существенны. Атом водорода представляет собой дефект типа центра дилатации. Благодаря высокой растворимости в металлах водород способен оказывать значительное влияние на динамику дислокаций, а, следовательно, и на формирование механических свойств металлов. При этом повышение скорости пластической деформации приводит к повышению влияния атомов водорода на механические свойства металла, в частности, на динамический предел текучести. Неупругие процессы в условиях высокоскоростной деформации весьма успешно описываются в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД). При этом огромную роль в формировании механических свойств металлов в условиях высокоэнергетических внешних воздействий играют динамические эффекты коллективного взаимодействия структурных дефектов металла с движущимися дислокациями. Воспользовавшись результатами теории ДВД, получим вклад динамического торможения дислокаций атомами водорода в величину динамического предела текучести наводороженного металла

$$\tau_n = \frac{\beta \& n_n}{\lambda + \sqrt{n_n}}$$

Здесь β и λ – коэффициенты, зависящие от плотности дислокаций и упругих модулей кристалла, $\&$ – скорость пластической деформации, n_n – безразмерная концентрация атомов водорода. Численные оценки показывают, что торможение дислокаций атомами водорода при его высокой концентрации может увеличивать динамический предел текучести наводороженных металлов на десятки процентов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ КЛЕЯ НА ОСНОВЕ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

А.С. Мальцев^{1,2}, О.Ю. Сметанников²

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
Россия

Lekanys@mail.ru

В современных условиях часто используются клеевые соединения в различных областях таких как: приборостроение, авиастроение, машиностроения и т.д. Одним из таких устройств в области приборостроения является маятниковый акселерометр КА-1. Существует необходимость проводить моделирование акселерометра для определения влияния дефектов на работу прибора. В условиях вибрации и изменения температур клеи проявляют явные вязкоупругие свойства, что требуется учитывать в математической модели. Это делает актуальной задачу идентификации вязкоупругих свойств материала.

Для определения вязкоупругих констант использовались данные вибрационных испытаний балок клея при различных температурах, проведенные на кафедре ИУ-2 МГТУ. Результатами испытаний являются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) клея в диапазоне температур от -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$. Далее была построена математическая модель поведения образца клея в программном пакете ANSYS APDL в условиях вибрации. Вычисление констант вязкоупругой модели производилось из решения задачи минимизации разницы между результатами эксперимента и численным решением с подобранными параметрами. Такая задача по минимизации решалась с помощью параметрической оптимизации в программном пакете OptiSLang. Последовательность решения задачи выглядела таким образом: изначально берется первое приближение характеристик материала с помощью которых решается вибрационная задача в ANSYS APDL, далее полученный результат в виде АЧХ отсылается в OptiSLang и на основании оптимизационного алгоритма вычисляется следующая точка поиска.

Предложенный метод определения термо-вязкоупругих констант материала по данным вибрационных экспериментов и разработанный программный модуль позволяют в дальнейшем вычислять вязкоупругие свойства не только клея, но и других материалов, проявляющих вязкоупругие свойства. Планируемые в дальнейшем исследования, целью которых является определение влияния дефектов изготовления или сборки на работу акселерометра КА-1, предполагают построение математической модели прибора со свойствами материалов, полученных в данной работе.

ВЛИЯНИЕ ВСЕСТОРОННЕЙ КОВКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА Al-Mg-Si

А.Г. Мочуговский, А.В. Михайловская

Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, РФ
mochugovskiy@mail.ru

Формирование микрозеренной структуры в алюминиевых сплавах является актуальной проблемой металловедения, так как такая структура позволяет увеличить прочность и пластичность сплавов. Среди алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si активно используются в авиастроении и автомобильном машиностроении благодаря их легкости, хорошим механическим свойствам и технологичности. Данные сплавы являются малолегированными, т.к. содержат суммарно как правило не более 3 масс. % Mg и Si. Низкая степень легированности твердого раствора осложняет формирование микрозеренной структуры ввиду активного роста зерна при повышенных температурах.

Перспективным способом формирования микрозеренной структуры является всесторонняя изотермическая ковка (ВИК). Данный метод состоит в накоплении значительной деформации в материале при неизменной геометрии образца. Достоинством ВИК можно считать относительно низкую энергоёмкость, что позволяет обрабатывать массивные заготовки. Метод ВИК показал свою эффективность для измельчения зерна в алюминиевых сплавах, в том числе Al-Mg-Si. Однако обеспечение термической стабильности структуры требует отдельного подхода, состоящего в микролегировании малыми добавками дисперсоидообразующих элементов. Такие добавки способствуют формированию наноразмерных частиц, препятствующих росту зерна и повышающих уровень прочности.

В данной работе в качестве объекта исследования был выбран сплав Al-Mg-Si-Cu. Сплав получен методом наполнительного литья со скоростью охлаждения $\sim 20\text{K/s}$. После двухступенчатой гомогенизации сплав подвергали всесторонней изотермической ковке при трех температурах 150, 250, 350 °C.

В ходе кристаллизации в исследуемом сплаве образуются две Sc-содержащие фазы: богатая медью W(AlCuSc)-фаза с растворенными атомами Si и не содержащая медь фаза AlSc₂Si₂. Благодаря стабилизации границ зерен дисперсоидами L1₂ фазы, стимулированного зародышеобразования на крупных частицах Mg₂Si и большой величине накопленной деформации формируется микрозеренная структура со средним размером зерен 1,2-2,1 мкм. После ковки при 350 °C сплав испытывали на растяжение в интервале температур 440-500 °C и скоростей деформации $2 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2} \text{ c}^{-1}$. Сплав продемонстрировал максимальное удлинение до разрушения $\sim 300\%$ при 460 °C. При комнатной температуре сплав имел следующие механические характеристики: предел текучести $326 \pm 5 \text{ МПа}$, предел прочности $366 \pm 5 \text{ МПа}$, относительное удлинение $10 \pm 3\%$.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-79-00253

ВЛИЯНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ НА МИКРОСТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1 В РЕКРИСТАЛЛИЗОВАННОМ И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ СОСТОЯНИЯХ

С.С. Манохин¹, Д.А. Колесников², И.В. Неласов^{1,2}, Д.В. Лазарев², В.И. Бетехтин³,
А.Г. Кадомцев³, М.В. Нарыкова³, Ю.Р. Колобов^{1,4}

¹ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

²ГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород, Россия

³Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия
manohin@icp.ac.ru

Одной из фундаментальных задач физики прочности является оценка эксплуатационного ресурса (долговечности) конструкционных материалов и разработка методов его повышения. Как известно, в течение всего времени пребывания материалов под нагрузкой в них параллельно с развитием пластической деформации, часто сопровождаемой изменениями текстуры, накапливается пластическое разрыхление (разуплотнение), обусловленное в основном образованием повреждений в виде пор и трещин. Выявление параметров дефектной структуры металлических материалов при развитии пластической деформации и переходе к завершающей стадии процесса разрушения, при длительных нагружениях важно как с практической, так и научной точки зрения.

Методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии исследовано изменение микроструктуры и кристаллографической текстуры, а также наличие микро- и нанопористости промышленного алюминиевого сплава АД1 в рекристаллизованном и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях до и после испытаний при растяжении в режиме ползучести при 0.3Тпл (100 °С). Установлено, что в процессе ползучести в рекристаллизованной структуре происходит дробление крупных вытянутых зерен на зёрна и субзерна меньшего размера, при этом увеличивается доля малоугловых границ. В УМЗ структуре, при ползучести, наблюдается рост зерен (собирательная рекристаллизация). Установлено наличие сильной радиальной текстуры: [001] кристаллографическое направление решёток зёрен преимущественно параллельно направлению прокатки. Такая текстура, характерна для образцов в обоих указанных выше состояниях. После испытаний на ползучесть в образцах с УМЗ структурой наблюдается изменение оси текстуры с [001] на [011]. Кроме этого, обнаружено формирование частиц вторичных фаз - карбида алюминия и соединений кремния, которые идентифицированы с привлечением расчёта фазовых диаграмм в рамках методологии CALPHAD. Проанализирована связь включений вторичных фаз и образующейся при пластической деформации нанопористости, а также роль включений и нанопор для длительной прочности (и ресурса) микрокристаллических и субмикрокристаллических металлов и сплавов.

Данная работа в части, связанной с исследованием структуры, выполнена по теме Государственного задания FFSG-2024-0016, № государственной регистрации 124020500064-2. В части, связанной с анализом особенностей применения компьютерного моделирования для анализа природы выделяющихся вторичных фаз при различных обработках многокомпонентных сплавов – с финансированием проекта Российского научного фонда (проект № 22-13-00324). Структурные исследования проводились с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН (г. Москва).

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, МИКРОСТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ МАРТЕНСИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Л.В. Мухамедзянова, В.В. Бобырь, Т.В. Князюк

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия
l.galyatkina@gmail.com

Высокопрочная мартенситная нержавеющая сталь марки 08X14НДЛ применяется для изготовления элементов движителей в судовом машиностроении, поскольку имеет высокую коррозионную и кавитационную стойкость и прочность. Технология литья данной стали имеет некоторые недостатки, главным из которых являются газовые поры, неслиты, усадочные раковины и др., а также химическая и структурная неоднородность стали по сечению заготовки. В настоящее время прорабатываются технологические решения использования данной стали в аддитивном производстве, что может привести к снижению доли брака и, возможно, к повышению уровня механических свойств стали. Главными достоинствами аддитивного производства являются сокращение цикла производства изделий сложной формы и высокий коэффициент использования материала.

Аддитивной технологией прямого лазерного выращивания (ПЛВ) из порошка высокопрочной нержавеющей стали марки 08X14НДЛ изготовлена серия объемных (кубических) образцов на разном технологическом оборудовании: лабораторной установке LENS 750 и промышленной ИЛИСТ-L. Проведен сравнительный анализ химического состава, микроструктуры, плотности и твердости полученных образцов.

Определены зависимости твердости образцов от режимов сплавления, полученных на различных установках. Показано влияние размера сфокусированного диаметра лазерного луча, мощности и скорости сканирования, а также угла штриховки на макро- и микроструктуру образцов. Установлено, что в связи с меньшими размерами пятна сканирования, а, следовательно, большими значениями энерговложения при построении образца на лабораторной установке формируется структура с меньшим размером кристаллизованных ванн расплава, более мелким зерном и меньшим количеством несплошностей, обеспечивающая более высокую твердость образцов. Установлено, что изменение угла штриховки с 90 на 45° приводит к увеличению значений твердости образцов.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Е.Д. Назарова

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

Nazarova42@list.ru

Остаточные сварочные напряжения (ОСН) в основном металле и металле шва сварной конструкции влияют на траекторию распространения трещиноподобных дефектов и уровень суммарных напряжений, действующих в конструкции. Поэтому при проведении прочностных расчетов в процессе проектирования, для обеспечения работоспособности конструкции, необходимо: 1) учитывать возникающие ОСН как фактор дополнительного нагружения, 2) учитывать распределение ОСН при поверочном расчете на циклическую долговечность.

Существуют различные способы оценки ОСН в конструкциях: неразрушающие методы контроля, разрушающие методы и численные расчеты. Неразрушающие методы позволяют измерять ОСН на поверхности конструкции, что не в полной мере отражает картину для конструкций с большими толщинами. Разрушающие методы оценки тоже дают искаженную картину, поскольку в процессе подготовки образцов для испытаний меняется характер распределения ОСН. Поэтому изучение ОСН и сварочных деформаций численными методами является перспективным.

Моделирование ОСН конечно-элементными методами (МКЭ) с использованием известных экспериментальных температурных зависимостей характеристик материалов приводит к некорректным результатам. В связи с этим была поставлена задача внести корректировки в используемые при расчетах температурные зависимости свойств материалов таким образом, чтобы результаты расчетов согласовывались с экспериментально полученными остаточными деформациями.

Для проведения экспериментов выбрана высокопрочная хладостойкая сталь 09ХН2МД (листовой прокат толщиной 15 мм) со следующими прочностными характеристиками: временное сопротивление 790 МПа, условный предел текучести 744 МПа, из которой изготовлены тавровые соединения с непваром.

В ходе сварки с применением трех различных технологий (аргодуговой, ручной и полуавтоматической) выполнялись измерения перемещений в зависимости от времени в удаленной от шва точке. Полученные результаты легли в основу создания цифрового двойника основного металла и металла шва. На шлифах были проведены измерения катетов шва, глубины проплавления и ширины зоны термического влияния, что легло в основу построения геометрической модели в ANSYS. В результате работы были предложены изменения в используемые при моделировании температурных зависимостей модуля Юнга, предела текучести и температурных деформаций, учитывающие наличие фазовые превращений.

После сварки проведены усталостные испытания и испытания на статическое растяжение. Результаты работы требуют дальнейшего анализа и могут быть использованы при численном анализе условий распространения трещины.

ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА МИКРОМЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВА КАНТОРА С РАЗЛИЧНОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

А.С. Нифонтов, Е.Г. Астафурова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия,
alexeyn@ispms.ru

В работе было изучено влияние наводороживания на механизмы разрушения высокоэнтропийного сплава Кантора (19,8Fe-19,5Mn-18,6Cr-21,0Ni-21,1Co, масс. %) с различной микроструктурой. Литые заготовки отжигали при $T = 1200^{\circ}\text{C}$ (2 ч) с закалкой в воду и прокатывали с обжатием 75%. После прокатки для получения различной микроструктуры были проведены: 1 – отжиг при $T = 1200^{\circ}\text{C}$ (2 ч) с закалкой в воду для формирования крупного аустенитного зерна (К-ВЭС, $d = 215 \pm 77$ мкм), 2 – для формирования гетерофазного состояния проводили старение обработанных по режиму 1 образцов при $T = 900^{\circ}\text{C}$ (1 ч) (С-ВЭС, $d = 215 \pm 77$ мкм, частицы \square -фазы, выделившейся по границам зерен, имеют пластинчатую форму с размером пластин 150 ± 25 нм в ширину и 740 ± 170 нм в длину), 3 – для формирования мелкокристаллической структуры прокатанные образцы отжигали при $T = 950^{\circ}\text{C}$ (1 ч) с закалкой в воду (М-ВЭС, $d = 25 \pm 10$ мкм). Наводороживание образцов проведено электролитическим методом при плотности тока $j_{\text{H}} = 10$ мА/см² (50 ч) при комнатной температуре в 3%-водном растворе NaCl (с добавлением 3 г/л NH₄SCN). После наводороживания образцы подвергли одноосному статическому растяжению при скорости деформации 5×10^{-4} 1/с. Микроструктуру изломов изучали с помощью методов растровой микроскопии.

Установлено, что до насыщения водородом образцы во всех состояниях разрушались вязко транскристаллитно с формированием ямочного излома на поверхностях разрушения. Насыщение водородом приводит к появлению хрупкого слоя на боковых поверхности исследуемых образцов. Во всех состояниях наводороженный слой разрушается хрупко, преимущественно интеркристаллитно, однако на поверхности разрушения также присутствуют транскристаллитные фасетки. Уменьшение размера зерна (М-ВЭС) и выделение частиц σ -фазы (С-ВЭС) по границам зерен не влияют на механизм разрушения хрупкого наводороженного слоя, но способствуют уменьшению его толщины (D_{H}). Уменьшение D_{H} хрупкого индуцированного водородом слоя в образцах М-ВЭС ($D_{\text{H}} = 21,5 \pm 5,0$ мкм) и С-ВЭС ($D_{\text{H}} = 28,0 \pm 7,0$ мкм) по сравнению с образцами К-ВЭС ($D_{\text{H}} = 69,7 \pm 20,7$ мкм мкм) связано с увеличением объемной плотности эффективных ловушек для водорода – границ зерен в первом случае и межфазных границ – во втором. Для образцов К-ВЭС и М-ВЭС характерно преимущественно интеркристаллитное растрескивание с небольшой долей транскристаллитных трещин. При этом в гетерофазных образцах С-ВЭС значительно увеличивается доля транскристаллитных трещин, по сравнению с образцами К-ВЭС и М-ВЭС, из-за различий в строении и плотности межфазных (С-ВЭС) и межзеренных границ (К-ВЭС и М-ВЭС), присутствующих в материале с разной микроструктурой, и из устойчивости к водородно-индуцируемой декогезии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00261, <https://rscf.ru/project/20-19-00261/>. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» (НФПМ СО РАН, Томск). Авторы выражают благодарность М.Ю. Панченко за помощь в исследовании и интерпретации результатов.

ИЗМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ ЛИТОГО СПЛАВА $Ti_{40,7}Hf_{9,5}Ni_{44,8}Cu_5$

И.В. Поникарова¹, Н.Н. Реснина¹, С.П. Беляев¹, А.В. Сибирев¹, М.Е. Трофимова¹,
А.И. Базлов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург Россия,

²НИТУ МИСиС, Москва, Россия

ivp2001@yandex.ru

Целью настоящей работы было изучение изменения мартенситных превращений и функциональных свойств при термоциклировании образцов литого сплава $Ti_{40,7}Hf_{9,5}Ni_{44,8}Cu_5$. Изменение параметров мартенситных переходов при термоциклировании изучали методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Изменение плотности дефектов при термоциклировании исследовали методом 4-х точечного измерения электросопротивления в аустенитной и мартенситной фазах. Изменение обратимой деформации и температур мартенситных превращений исследовали при термоциклировании под постоянной нагрузкой.

Установлено, что литой сплав содержит основную матрицу $(Ti,Hf)_{50,2}(Ni,Cu)_{49,8}$ со средним размером дендритных зерен 600 мкм и вторичную фазу типа $(Ti,Hf)_2(Ni,Cu)$, частицы которой со средним размером 0,5 мкм расположены по границам дендритных ячеек, средний размер которых составляет 30 мкм. По данным дифференциальной сканирующей калориметрии сплав испытывает $B2 \leftrightarrow B19'$ мартенситное превращение, температуры которого по-разному смещаются при термоциклировании. За первые пятьдесят циклов температуры обратного перехода уменьшаются на 45 °C (A_s) и 52 °C (A_f), а температуры прямого перехода на 29 °C (M_s) и 14 °C (M_f). За следующие 150 циклов температура M_s не меняется, а остальные температуры уменьшаются на 5 °C. Начиная с 200 цикла, температура A_f не меняется, а остальные температуры возрастают на 4 °C. Установлено, что изменение электросопротивления с циклами больше в мартенситном состоянии, чем в аустенитном. Показано, что электросопротивление значительно возрастает в первых 50 циклах (на 8 % в мартенсите и 2,5% в аустените). За следующие 150 циклов сопротивление увеличивается на 1 и 0,7 % соответственно. Начиная с 200 цикла сопротивление возрастает на 0,5 % в мартенсите и не меняется в аустените. Рост электросопротивления свидетельствует об увеличении плотности дефектов в материале, что в свою очередь должно приводить к уменьшению температур переходов. Вместе с тем данные калориметрии показали, что начиная с 200 цикла температуры переходов возрастают с циклами, что указывает на то, что смещение температур перехода при термоциклировании обусловлено не только изменением плотности дефектов.

При термоциклировании под напряжением 150 и 200 МПа величина эффекта памяти формы увеличивается за счет эффекта тренировки, необратимая деформация не превосходит 0,2% и не меняется с циклами. Увеличение напряжения до 300 МПа подавляет эффект тренировки, при этом наблюдается значительная необратимая деформация, которая уменьшается с циклами. Установлено, что чем больше напряжение, действующее в цикле, тем меньше изменение температуры переходов при термоциклировании.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 23-19-00280.

НАГРУЖЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT-8 ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ГИГАЦИКЛОВОМ

В.А. Оборин, М.В. Банников, М.А. Соковиков, О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

oborin@icmm.ru

В работе проведено исследование кинетики роста усталостных трещин в титановом сплаве VT-8 в режиме гигациклового усталости при предварительном динамическом деформировании. Актуальность постановки определяется важными приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полетного цикла при случайных динамических воздействиях.

Предварительное нагружение образцов из сплава титана VT-8 осуществлялось динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского при скоростях деформации до $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$, после чего образцы подвергались циклическим нагрузкам на испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 при принудительном воздушном охлаждении сжатым воздухом с последующим изучением фрактографии изломов разрушенных образцов.

Усталостное нагружение проводилось на ультразвуковой испытательной машине резонансного типа при уровнях напряжений 200-500 МПа. Ультразвуковая испытательная машина позволяет испытывать материалы на базе 10^9 - 10^{10} циклов с амплитудой от 1-го и до нескольких десятков микрон с частотой 20 кГц, что сокращает время испытания до нескольких дней.

Циклическое нагружение при указанных режимах показало значительное снижение усталостной долговечности с $2.23 \cdot 10^9$ критического количества циклов в исходном (недеформированном) состоянии до $6.38 \cdot 10^3$ предварительно нагруженного сплава VT-8 при уровне напряжений 585 МПа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-79-30041, <https://rscf.ru/en/project/21-79-30041/>

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА VT23

Д.Э. Сафарова, К.О. Базалеева, Ю.Ю. Понкратова, Р.Б. Шипшев

Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия
safarova_de@pfur.ru

Детали аэрокосмической отрасли должны выдерживать экстремальные условия эксплуатации, оставаясь при этом легкими. Титановые сплавы привлекательны в аэрокосмической промышленности благодаря своей высокой удельной прочности, вязкости разрушения, усталостной стойкости и коррозионной стойкости. Однако титан является достаточно дорогим и труднообрабатываемым материалом, а традиционные методы обработки приводят к большому количеству отходов материала, длительному производственному циклу и, следовательно, очень высокой стоимости процесса. Создание изделия максимально приближенного к конфигурации конечной детали позволит значительно снизить затраты на производство, а также ускорить этот процесс.

Аддитивное производство, в частности прямое лазерное выращивание (ПЛВ) представляет собой технологию, которая позволяет послойно воздавать изделия необходимой конфигурации и любой сложности геометрии. Прямое лазерное выращивание оптимизирует разработку и производство новых продуктов за счет значительного сокращения отходов материалов и количества производственных этапов.

Цель работы – подбор благоприятных режимов для прямого лазерного выращивания объектов из титанового сплава VT23, а также исследование полученных структур.

Процесс прямого лазерного выращивания производился на лазерном принтере InssTek MX-Grande с варьированием скорости сканирования от 600 до 1000 мм/мин с шагом 200 мм/мин и мощности лазера от 700 до 1300 Вт с шагом 100 Вт.

Первичная оценка режима ПЛВ проводилась по параметрам единичного трека: по коэффициенту формы валика, который определяется как отношение его высоты к ширине, по коэффициенту проплавления, ширине валика и углу у основания валика.

Полученные треки имеют четкую бездефектную границу раздела, а также обладают незначительной пористостью. Объекты, полученные при режимах со скоростью 600 мм/мин, не удовлетворяют критериям качества. Геометрические параметры единичных треков, сформированных при скоростях 800 и 1000 мм/мин, соответствуют указанным параметрам.

При формировании монослоев варьировалось расстояние между треками. Оценка качества монослоев проводилась по следующим критериям: перепад высот не более 30 % от высоты валика и глубина проплавления менее 2/3 от высоты валика.

Анализ структуры и свойств сплава после прямого лазерного выращивания проводился с помощью методов световой оптической металлографии, лазерной сканирующей микроскопии, рентгенофазового и дюриметрического анализов.

Независимо от режима ПЛВ фазовый состав, полученных образцов представлен 70 % α -фазы и 30 % β -фазы.

Микротвердость единичных треков возрастает от 400 до 500 HV с увеличением мощности лазера. Однако микротвердость объемных образцов оставляет ~ 460 HV практически не меняется при варьировании мощности.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ

М.В. Сергеев, Р.Р. Балохонов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
sergeevmaximv@gmail.com

В авиационной, космической и автомобильной промышленности активно применяются сплавы на основе алюминия. В процессе использования эти сплавы подвергаются различным температурным и механическим воздействиям при разнообразных скоростях нагружения. Для достоверного прогнозирования их деформационного поведения необходимы математические модели, учитывающие температурную и скоростную чувствительность материала, а также особенности морфологии структуры.

В данном исследовании представлена модель деформации и разрушения поликристаллических алюминиевых сплавов в трехмерной постановке, которая включает в себя термомеханическое определяющее уравнение для многомерных течений. Основная цель исследования заключается в анализе влияния структуры поликристалла на степень и характер локализации пластической деформации, а также на распределение напряжений и пластических деформаций в зависимости от скорости деформации, влияние которой также рассматривается на характер разрушения материала.

Результаты моделирования процесса локализации пластической деформации свидетельствуют о том, что поликристаллическая структура играет ключевую роль в формировании участков локализации пластической деформации на ранних этапах нагружения. Эти участки возникают еще на стадии упругой деформации, когда весь однородный образец еще испытывает упругие деформации. Однако даже при продолжающемся пластическом течении, когда весь однородный образец уже испытывает существенные пластические деформации, в поликристалле по-прежнему наблюдаются локальные области, где сохраняется упругая деформация. Учет поликристаллической структуры в явном виде приводит к снижению значений напряжения на макроскопической кривой течения. При увеличении скорости деформации изменяются места зарождения первичных трещин, увеличивается доля разрушенного материала, и происходит множественное растрескивание образца.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0002.

ЭМИССИИ РЕШЕТОЧНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ ИЗ ТРОЙНЫХ СТЫКОВ ГРАНИЦ ЗЕРЕН В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИКАХ С АМОРФНЫМИ МЕЖКРИСТАЛЛИТНЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ

Н.В. Скиба, М.Ю. Гуткин

Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
nikolay.skiba@gmail.com

Известно, что высокотемпературные керамические материалы и композиты обладают высокой прочностью, твердостью и износостойкостью, сохраняя эти свойства при повышенных температурах. Эти уникальные свойства во многом зависят от деформационного поведения межкристаллитных границ, которые часто содержат аморфные межкристаллитные прослойки (АМП). В работах Demkowicz et. al. по компьютерному моделированию аморфного кремния было показано, что материал разделен на две фазы: твердоподобную матрицу и области жидкоподобной фазы. Основываясь на этих результатах, в теоретических моделях Гуткина et. al. был разработан механизм пластической деформации нанокерамик с АМП за счет зарождения и эволюции включений жидкоподобной фазы (ВЖФ) в границах зерен (ГЗ). В этих теоретических работах были рассмотрены два случая дальнейшего развития пластической деформации нанокерамики с АМП: за счет зарождения на ВЖВ нанотрещин и за счет преодоления ВЖФ тройных стыков ГЗ с АМП. В настоящей модели представлен третий вариант развития пластической деформации в высокотемпературных нанокерамиках за счет испускания решеточных дислокаций (РД) из тройных стыков АМП с ВЖФ и их скольжения в соседних зернах.

В рамках модели, на первой стадии пластическая деформация осуществляется за счет зарождения и эволюции ВЖФ в АМП под действием внешнего сдвигового напряжения. Образец деформируется по этому механизму пластичности до тех пор, пока ВЖФ не встретят препятствие, которым (в случае нанокерамики) является ближайший тройной стык АМП. На второй стадии пластическая деформация развивается за счет зарождения на ВЖФ РД и их испускания из тройных стыков АМП с последующим скольжением в теле зерна. В модели, на примере высокотемпературной нанокерамики α - Al_2O_3 , построены температурные зависимости критических напряжений зарождения ВЖФ, испускания РД из тройных стыков АМП и скольжения РД вдоль плоскости базисной и призматической систем скольжения. Показано, что существует определенная критическая температура деформации, ниже которой базисное скольжение предпочтительнее призматического скольжения. В случае высокотемпературной нанокерамики α - Al_2O_3 с АМП критическая температура деформации увеличивается с 400 К до 550 К, когда размер ВЖФ увеличивается с 5 нм до 15 нм, а затем не меняется при дальнейшем увеличении размера включения. Таким образом, пластическая деформация высокотемпературной нанокерамики может эффективно происходить за счет эмиссии РД из тройных стыков АМП с ВЖФ при повышенных температурах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00236, <https://rscf.ru/project/23-19-00236>.

ЭФФЕКТ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ГОРЯЧЕЙ КОВКОЙ И КРИОГЕННОЙ ПРОКАТКОЙ НА ИЗБЫТОЧНЫЕ ФАЗЫ В ВЫСОКОПРОЧНОМ АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ

**В.В. Терешкин, М.А. Ахметшин, Е.В. Автократова, С.В. Крымский,
О.Ш. Ситдииков, М.В. Маркушев**

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия
Stierieshkin@mail.ru

При термомеханической обработке высокопрочных алюминиевых сплавов, относящихся к многокомпонентным системам, помимо структуры матрицы претерпевают изменения и должны контролироваться, и остальные структурные составляющие. А именно частицы и выделения вторых фаз, зачастую играющие доминирующую роль в уровне их ресурсных и кратковременных свойств.

Цель работы - с использованием оптической и растровой электронной микроскопии проанализировать поведение грубых избыточных фаз при всесторонней изотермической ковке и криогенной прокатке до больших степеней высокопрочного алюминиевого сплава 1965 (Al-8,1Zn-2,2Mg-2,3Cu-0,27Sc-0,10Zr-0,10Mn, вес%).

Ковку гомогенизированного слитка проводили на гидравлическом прессе в интервале температур 440-390 °С до суммарной степени деформации $\epsilon \sim 12$. Прокатку предварительно закаленных слитка и поковки с 20 и 6 мкм зёрнами соответственно, проводили до суммарных обжатий 90% ($\epsilon = 2,3$) при температуре жидкого азота.

Обнаружено, что в слитке избыточные фазы со средним эквивалентным диаметром $\sim 1,5$ мкм и объемной долей около 2,5 % имели неравноосную форму с развитой межфазной границей. Они располагались вдоль границ зёрен и в тройных стыках в виде конгломератов Mg₂Si, T(AlMgCuZn), M(AlMgCuZn) и W(AlCuSc) фаз. В результате горячейковки объемная доля частиц не изменилась, а их размер уменьшился в два раза вследствие дробления конгломератов, обусловленного их формой и хрупкостью. При этом частицы в объеме поковки были распределены более однородно и также фиксировались преимущественно вдоль границ зёрен.

Криопрокатка слитка, как ни парадоксально, привела к тому же результату – размер частиц уменьшился до 0,7 мкм. Аналогичный размер был зафиксирован и в криокатаной поковке, свидетельствуя о завершении активного хрупкого разрушения частиц на стадии горячейковки слитка. Однако прокатка также приводила к изменению пространственного расположения частиц. При прокатке слитка конгломераты и их фрагменты, а также отдельные вытянутые фазы хрупко разрушались и одновременно выстраивались в строки в направлении прокатки. А разрушенные при ковке частицы также приобретали аналогичную пространственную ориентацию, и также чаще оказывались на продольных границах зёрен, приобретавших форму блина.

Сделан вывод об отсутствии интенсивного деформационно-индуцированного растворения избыточных фаз в предварительно гомогенизированном слитке в условиях горячей и холодной деформации с большими степенями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00702 на базе Центра коллективного пользования ИМСП РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

ЦИКЛИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ БОЛЬШИХ ОБРАТИМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В МАРТЕНСИТНОМ СОСТОЯНИИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА

$\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$

А.Б. Тохметова, Е.Ю. Панченко, Ю.И. Чумляков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск,
Россия
aida-tx@mail.ru

В сплавах с памятью формы на основе NiFeGaCo , испытывающие мартенситные превращения (МП), возможно путем проведения старения в мартенситном состоянии под сжимающей нагрузкой (СМН) получить большие обратимые деформации как в циклах охлаждение/нагрев при развитии L_{21} - $10M(14M)$ - L_0 МП, так и в циклах нагрузка/разгрузка в мартенситном состоянии. Это происходит благодаря стабилизации преимущественного раздвоиникованного варианта L_0 -мартенсита вдоль $[110]_{L_{21}}$ -направления при СМН. При этом вдоль $[001]_{L_{21}}$ -направления индуцируется двусторонний эффект памяти формы (ДЭПФ) с растягивающей обратимой деформацией до +9,0 % в циклах охлаждение/нагрев. В случае приложения сжимающей нагрузки вдоль того же $[001]_{L_{21}}$ -направления благодаря процессам переориентации мартенситных вариантов за счет обратимого движения двойниковых границ наблюдаются большие обратимые деформации до -16,0 % при проявлении ферроэластичности (ФЭ) в мартенситном состоянии. Для практического применения необходимо выяснить способность выдерживать периодически повторяющиеся воздействия в циклах нагрузка/разгрузка при проявлении ФЭ на монокристаллах сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$, что и является актуальной задачей данного исследования.

Для исследования монокристаллы $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ после предварительной термообработки (отжиг от $T = 1448$ К, 1 ч с закалкой в воду) были подвергнуты СМН при $T = 423$ К вдоль $[110]_A$ -направления, 1 ч под сжимающей нагрузкой $\sigma = 445$ МПа. Стабилизация L_0 -мартенсита при таком режиме СМН приводит к проявлению вдоль $[001]$ -направления ДЭПФ с величинами растягивающей деформации +8,3 % и ФЭ с обратной деформацией - 16,0 % в циклах нагрузка/разгрузка ниже температур МП в широком температурном интервале ~100 К (от 248 до 343 К).

Проведено исследование циклической стабильности ФЭ при комнатной температуре до 5 000 циклов нагрузка/разгрузка с максимальной обратимой деформацией до 16,0 % (образец 1) и 100 000 циклов с заданной деформацией 10,0 % (образец 2). Экспериментально показано, что с ростом числа циклов до 5 000 в обоих образцах происходит медленная деградация кривых ФЭ: критические напряжения переориентации мартенситных вариантов $\sigma_{кр}$ в образце 1 снижаются на 66 %, необратимая деформация $\epsilon_{необр}$ увеличивается до 8,5 %, тогда как в образце 2 $\sigma_{кр}$ уменьшаются на 8 %, $\epsilon_{необр}$ составляет 4,0 %. Увеличение циклов до 100 000 в образце 2 сопровождается снижением $\sigma_{кр}$ на 23 % и ростом $\epsilon_{необр}$ до 7,2 %. Переориентация мартенситных вариантов под нагрузкой сопровождается релаксацией напряжений с образованием дислокаций, тем не менее, величина $\epsilon_{необр}$ в циклах нагрузка/разгрузка не определяется только деградацией материала за счет пластической деформации. Значительная доля $\epsilon_{необр}$, наведенная в образцах 1 и 2 при циклических испытаниях ФЭ, исчезает при последующей реализации ДЭПФ в цикле нагрев/охлаждение. Исследование ДЭПФ свидетельствует также о медленной микроструктурной деградации в обоих образцах: уменьшаются обратимая деформация на ≈ 1 % и температуры МП на 11–23 К после 5000 в образце 1 и 100 000 циклов в образце 2 по сравнению с первым циклом после СМН.

Таким образом, показано, что монокристаллы выдерживают до 100 000 циклов нагрузка/разгрузка при проявлении ФЭ с обратимой деформацией до 10 % без разрушения образца. Для увеличения циклической стабильности таких больших обратимых деформаций необходимо уменьшить рассеяние энергии и обеспечить высокую подвижность двойниковых границ в мартенсите так, чтобы величина деформирующих напряжений оставалась выше величины механического гистерезиса при циклических испытаниях.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И КАРТИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОДОВЫХ КОЛЕЦ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННЫХ И ХВОЙНЫХ ПОРОД МЕТОДАМИ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ И СКРЕТЧ-ТЕСТА

А.И. Тюрин¹, А.А. Самодуров¹, В.А. Шамаев², В.В. Коренков¹, В.А. Тюрин¹,
М.А. Юнак¹

¹Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Россия

²Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия

tyurinalexander@yandex.ru

С точки зрения физического материаловедения древесина является природным, иерархически сложно структурированным композитным материалом с ярко выраженными гетерогенностью и анизотропией прочностных свойств. Это во многом определяется сложностью ее структуры, в которой можно выделить целый ряд масштабно-иерархических уровней – от субнано- до макро- (атомно-молекулярный; нано- – нанокристаллы, нанофибриллы; микро- – микроволокна, клеточные стенки; мезо- – клетки, крупные сосуды и макро- – годовые кольца, макродефекты строения, трещины и т.п.). Каждый из них вносит свой вклад в формирование всего комплекса физико-механических свойств. При этом для изучения строения древесины, ее кольцевой и клеточной структуры обычно используют оптические методы, основанные на анализе оптических свойств, которые напрямую не связаны с физико-механическими характеристиками. Поэтому для исследования их распределений в последнее время стали применять не сильно распространенные в древесиноведении методы (рентгеновскую денситометрию, дающую информацию о локальной плотности древесины; синхротронное излучение; ядерный магнитный резонанс и некоторые другие). Однако эти методы достаточно трудоемки и требуют дорогостоящего оборудования.

В этой работе описаны возможности применения, а также экспериментальные результаты сканирования физико-механических свойств и построения карт их распределения методами наноиндентирования и скретч-тестирования на примере исследования древесины хвойных и лиственных пород (сосны обыкновенной, дуба черешчатого и лиственницы сибирской). Выявлено многократное увеличение микротвердости H и модуля Юнга E внутри отдельного годового кольца роста по мере перехода из зоны ранней древесины в зону поздней древесины. Установлены значительные различия в ходе внутрикольцевых радиальных зависимостей H и E для каждой из исследованных пород. Установлено отсутствие зависимости H и E в ранней древесине от ширины годового кольца w и обнаружена слабая их зависимость от w в поздней древесине. Величина w , измеренная методами наноиндентирования и скретч-теста по изменению физико-механических свойств, с точностью до 2-3% совпадает с измеренной традиционным оптическим методом. Разработанный метод и результаты могут быть полезны: а) для углубления понимания природы и механизмов формирования макромеханических свойств древесины различных пород в зависимости от их микроструктурных характеристик и условий роста; б) в задачах оптимизации технологий выращивания, укрепления и условий последующего использования древесины; в) при разработке новых высокоинформативных методов дендрохронологии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00231, <https://rscf.ru/project/23-16-00231/>.

ВЛИЯНИЕ НИОБИЯ НА ЭВОЛЮЦИЮ ТЕКСТУРЫ ПРОКАТКИ МЕДИ ПРИ ПОВЫШЕНИИ ДОЛИ НИОБИЯ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Cu-Nb

В.П. Тютин, М.Г. Исаенкова, Н.А. Михалёв, Э.Ю. Суарес, Д.С. Сухоруков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

VPTyutin@mephi.ru

Изучение процесса текстурообразования в многофазных сплавах является сложной задачей, включающей в себя не только учет взаимодействия систем скольжения и двойникования внутри каждой из фаз, но и взаимодействие самих фаз в процессе холодной деформации. Решение этой задачи возможно с применением свободно распространяемого программного обеспечения DAMASK, позволяющей реализовать методику моделирования кристаллической пластичности методом конечных элементов (CPFEM, Crystal Plasticity Finite Element Modelling) и являющейся удобным инструментом изучения кристаллографической текстуры.

Данная работа посвящена анализу (моделированию) эволюции структуры и текстуры в процессе деформации двухфазного двухкомпонентного сплава системы Cu-Nb, выбор которой обусловлен отсутствием промежуточных фаз и растворимости указанных металлов друг в друге. Использование такой системы позволяет учесть только механическое взаимодействие фаз и исключить влияние фазовых переходов, реализующихся в случае рассмотрения двухфазных сплавов (например, титановые $\alpha+\beta$ -сплавы). Выбранные сплавы Cu-10%Nb, Cu-18%Nb и Cu-25%Nb представляют собой механическую смесь кристаллов, характеризующихся ГЦК- и ОЦК-решетками и соответствующими системами пластической деформации. Данные сплавы, как и отдельные компоненты, не имеют полиморфных превращений в процессе пластической деформации, и устойчивы до температуры плавления.

Процесс моделирования состоял из следующих этапов: создание геометрии конечного элемента, задание файла упругих и пластических характеристик материала, систем пластической деформации и индивидуальных ориентировок кристаллов, задание файла прилагаемой нагрузки, расчет пластической деформации с использованием ПО DAMASK, обработка файлов результатов и их визуализация. При этом ориентации отдельных зерен формировались на основе экспериментальных полюсных фигур исходных образцов, что позволяет провести адекватное сравнение результатов моделирования кристаллографической текстуры и экспериментальных прямых полюсных фигур (ФРО). В процессе моделирования холодной прокатки сплавов в качестве варьируемых параметров процесса рассматривались объемная доля и размер зерен Nb и степень деформации. Сравнение рассчитанной текстуры с экспериментальными полюсными фигурами, построенными для последовательных этапов холодной прокатки пластин сплавов системы Cu-Nb, свидетельствуют о удовлетворительном совпадении.

Разработана модель процесса деформации двухфазных сплавов системы Cu-Nb, описывающая эволюцию их текстуры в процессе холодной прокатки. Установлены основные закономерности формирования текстуры прокатки в двухфазных сплавах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СВЕРХНИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов, Г.Ю. Романовский
ФГУП ЦНИИчермет им. И.П.Бардина, Москва, Россия
iqs12@yandex.ru

Известно, что температурные и деформационные режимы термомеханической обработки определяют комплекс свойств готового проката. Хорошо изучено влияние параметров деформационной обработки - контролируемой прокатки на свойства конструкционных сталей с феррито-перлитной и феррито-бейнитной структурой.

Сверхнизкоуглеродистая мартенситная сталь (СНМ сталь) является высокопрочным материалом, композиция легирования которого, позволяет получать закалочную мартенсито-бейнитную структуру при последеформационном охлаждении проката на воздухе. Поэтому исследование влияния режимов деформации на механические свойства и хладостойкость СНМ стали представляет интерес.

Опытная сталь была прокатана по режиму контролируемой прокатки с температурой окончания деформации в интервале 700 - 900°C и последующим охлаждением на воздухе.

Для выяснения оптимального режима контролируемой прокатки было проведено исследование влияния температуры окончания деформации на механические свойства и хладостойкость проката.

С целью определения влияния режимов деформации на сопротивление зарождению и распространению трещины проводили испытания на ударный изгиб в интервале температур +20 ÷ -60 °С на образцах двух типов: с острым надрезом КСV и острым надрезом с нанесенной усталостной трещиной КСТ, при этом определялась как величина ударной вязкости, так и характер разрушения образцов (доля вязкой составляющей в изломе).

Установлено, что прочностные свойства мало зависят от режима деформации стали: временное сопротивление практически одинаково, предел текучести оказался несколько ниже при температуре окончания деформации 710 С. В зависимости от режима деформации величина относительного удлинения составляет 20,8-27%, равномерного – 7,2-10,5%. Значения ударной вязкости металла – КСV²⁰ в зависимости от режима деформации составляет 180-257 Дж/см², КСV-40 – 48-273 Дж/см².

Показано, что снижение температуры конца прокатки приводит не только к повышению хладостойкости, но одновременно к увеличению доли работы распространения трещины, которая возрастает от 12-15% при Т_{кп}=920оС до 50% при Т_{кп}=775 °С при пропорциональном уменьшении доли работы зарождения трещины Аз.

Таким образом, очевидно, что большой запас вязкости и хладостойкости проката из СНМ стали связан не только с низким содержанием углерода, но существенно зависит от температуры деформации при контролируемой прокатке.

ВЫСОКОПРОЧНОЕ СОСТОЯНИЕ 3D-НАПЕЧАТАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОДВЕРГНУТОГО ИПД ОБРАБОТКЕ**Э.И. Усманов¹, Я.Н. Савина¹, Р.Р. Валиев¹, Р.З. Валиев¹, А.В. Панин^{2,3}**¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия²Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Томск, Россия³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

usm4nov-emil@yandex.ru

Проволочная электронно-лучевая аддитивная технология (ЭЛАТ) в последние годы получила активное развитие как один из наиболее высокопроизводительных методов 3D-печати. Известно, что методом ЭЛАТ можно успешно получать изделия из титанового сплава ВТ6, который является одним из наиболее распространенных конструкционных материалов. Однако 3D-напечатанный сплав ВТ6 обычно демонстрирует более низкие прочностные свойства по сравнению с тем же сплавом, полученным традиционными методами.

Хорошо известно, что повысить прочностные свойства металлических материалов можно посредством измельчения их зеренной структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Наиболее эффективным в измельчении микроструктуры является метод кручения под высоким давлением (КВД), который позволяет сформировать в материале структуру с размерами зерен менее 100 нм. Однако результаты последних исследований показывают, что наибольшего упрочнения металлических материалов можно достигнуть за счет комбинирования КВД и термических обработок с целью формирования в их объеме ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с различными наноструктурными образованиями (зернограницные сегрегации, нанокластеры и/или наночастицы вторых фаз). Эти наноструктурные особенности наряду с УМЗ структурой вносят дополнительный вклад в повышение прочности материалов.

Используя данный подход в настоящей работе 3D-напечатанный сплав ВТ6 подвергался комбинированной обработке ИПД, включающей двухэтапное КВД с промежуточными термическими обработками. В результате удалось достигнуть весьма высокой прочности данного материала ($\sigma_b \approx 1700$ МПа). На основании микроструктурных исследований предполагается, что природа высокопрочного состояния 3D-напечатанного сплава ВТ6 после предлагаемой комбинированной обработки обусловлена формированием в объеме материала УМЗ структуры со средним размером зерен около 100 нм и наноструктурными образованиями, такими как высокодисперсные частицы вторых фаз и зернограницные сегрегации легирующих элементов. Обсуждаются механизмы упрочнения сплава, обеспечивающие его сверхвысокую прочность.

Полученные результаты представляют интерес для дальнейших исследований по улучшению механических свойств 3D-напечатанных изделий различной геометрии с использованием различных методов ИПД обработки, в частности, трение с перемешиванием, которое, как известно, применяется для поверхностной обработки различных материалов, в том числе титановых сплавов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00445, <https://rscf.ru/project/22-19-00445/>.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СПЛАВА TiNi ПРИ ИСПЫТАНИЯХ В КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЕ

А.А. Чуракова^{1,2}

¹Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, Россия

²Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
churakovaa_a@mail.ru

Сплавы с памятью формы нашли широкое применение в медицине в качестве имплантируемых в организм длительно функционирующих материалов. Для использования сплавов TiNi в качестве устройств, работающих в коррозионных средах, к ним предъявляются повышенные требования по коррозионной стойкости в различных средах. Однако такие исследования практически отсутствуют. В качестве материала исследования был выбран сплав TiNi с большим содержанием Ni относительно стехиометрии - Ti_{49,0}Ni_{51,0}. Для формирования твердого раствора на основе фазы проводилась закалка сплава из области гомогенности (от 800 °C 1 час) в воду. В качестве коррозионных сред использовались следующие растворы: 0,9 % NaCl, растворы Рингера и Хэнкса. Исследования коррозионной прочности проводились на стандартных объемных образцах скоростью перемещения траверсы $1,2 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹. Испытания проводились как на воздухе при температуре 24 °C, так и в среде растворах Хэнкса, Рингера и 0,9% NaCl при температуре 37 °C. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в коррозионных средах наблюдается снижение предела прочности и предела текучести от 1 до 6,3 % в зависимости от коррозионной среды. Наибольшее снижение характерно для раствора Хэнкса, наименьшее для раствора Рингера. Механоциклирование образцов проводилось при выдержке в растворе Хэнкса и в 0,9 % растворе NaCl для оценки коррозионно-усталостной долговечности, следовало после достижения стационарных значений электродных потенциалов (≈ 7000 с). Деформация в каждом цикле осуществлялась посредством изгиба на установке «Устройство для изучения коррозионно-усталостного разрушения металлов и сплавов в ходе механических испытаний в жидком электролите» и составила 3 % за в каждом цикле (исследования проводились в НИТУ МИСиС). После начала процесса механоциклирования наблюдается скачок потенциала в область отрицательных значений (для всех исследуемых образцов), что возможно связано с разрушением пассивной пленки на поверхности образца, сформированной в процессе установления стационарного потенциала. Последующий процесс механоциклирования приводит к анодной поляризации (смещение значения электродного потенциала в область положительных значений), что может быть связано с постепенным восстановлением разрушенной пассивной пленки. После некоторого времени в процессе механоциклирования наблюдается монотонное смещение значений электродного потенциала в область отрицательных значений. Это может быть связано с увеличением плотности дислокаций в процессе механоциклирования, что в определенный момент приводит к разрушению пассивной пленки, и соответственно к смещению электродного потенциала в отрицательную сторону. Монотонное смещение потенциала в отрицательную сторону дает основание полагать, что процессы разрушения пассивной пленки преобладают над процессами ее образования. По мере дальнейшего процесса механоциклирования, и соответственно распространения коррозионно-усталостной трещины, удельная нагрузка на образец увеличивается вследствие уменьшения эффективного сечения образца (расход материала идет на образование пассивной пленки).

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ СТАЛИ X18N10T, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДАМИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ И ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ

И.В. Шакиров, Т.В. Князюк, П.А. Кузнецов, М.С. Михайлов

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Россия
i.v.shakirov@yandex.ru

Технологические процессы производства оказывают непосредственное влияние на формирование конечной структуры стали. Аддитивные технологии лазерного синтеза создают специфичные термокинетические условия для кристаллизации стали, оказывая влияние на процессы структурообразования, обуславливающие комплекс механических свойств, значительно отличающийся от стали, получаемой классическими процессами производства: литьём, прокаткой или ковкой. Аустенитные нержавеющие стали, не претерпевающие фазовых превращений при охлаждении вплоть до комнатной температуры, способны формировать различную по морфологии структуру в зависимости от условий кристаллизации.

Следовательно, для понимания возможностей технологий селективного лазерного сплавления (СЛС) и прямого лазерного выращивания (ПЛВ) по формированию свойств материала, необходимо установление взаимосвязи получаемого уровня механических свойств стали и соответствующего структурного состояния. В данном исследовании проводится оценка уровня механических свойств стали X18N10T, полученной методом ПЛВ, сравнение прочностных и пластических свойств стали в исходном и в термообработанном состоянии, оценка рекристаллизационной способности стали при различных режимах термообработки. Произведён анализ явления упрочнения стали, полученной технологиями лазерного синтеза, установлена взаимосвязь с морфологией структуры стали на основании исследований тонкой структуры и исследований морфологии дисперсных включений.

В результате данной работы были установлены механические свойства стали X18N10T, получаемые непосредственно после процесса СЛС и ПЛВ. Оценено влияние различных режимов термообработки на изменение структуры и свойств. Произведена оценка упрочненного состояния на основании микроструктурных исследований – идентифицированы дисперсные частицы, характер их распределения, отмечен вклад механизмов субструктурного и дисперсионного упрочнения стали, обусловленные спецификой кристаллизации и охлаждения стали в процессе СЛС и ПЛВ. Установлено, что кинетика рекристаллизации замедлена по сравнению со сталью, полученной классическими технологиями, что обуславливается наличием дисперсных частиц, обнаруженных методом просвечивающей электронной микроскопии. Данный эффект необходимо учитывать при назначении температуры аустенитизации аддитивных сталей.

Исследование выполнено за счет гранта РФФ, проект №21-73-30019

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ДЕФЕКТНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКОЙ

Э.Р. Шаяхметова, М.А. Мурзинова, А.А. Мухаметгаллина, А.А. Саркеева,
А.А. Назаров

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия
elvina1408@yandex.ru

В последнее десятилетие возрос интерес к получению твердофазных соединений методом ультразвуковой сварки (УЗС), о чем свидетельствуют многочисленные научные публикации. Несмотря на это, до сих пор не разработаны принципы выбора режимов сварки, стабильно обеспечивающие высокое качество соединений. Требуемое давление, амплитуда и время воздействия ультразвука зависят от свойств соединяемых материалов, а также от конструкции инструмента, передающего энергию ультразвука. В частности, от рельефа сварочного наконечника зависит распределение деформаций и температур в области сварной точки, которые во многом определяют условия формирования и особенности структуры соединений.

В данной работе приводятся результаты исследования влияния локальных деформаций "растяжения–сжатия" в поперечных сечениях образцов (ϵ_n) на качество соединений листов меди толщиной 0,8 мм. УЗС выполняли с частотой 20 кГц и амплитудой колебаний 17–20 мкм. Наконечник и наковальня имели зубчатый рельеф с глубиной насечек 0,4 мм. Варьировали величину сжимающей силы от 2,5 до 3,5 кН и длительность УЗС от 1 до 3 секунд. Для оценки качества сварных соединений определяли прочность соединений на сдвиг при растяжении; распределение ϵ_n , и соответствующее распределение относительной протяженности бездефектных участков шва или линейную плотность соединений (ЛПС).

Показано, что УЗС позволила получить соединения листов меди, сдвиговая прочность которых достигала 76 МПа. Образцы разрушались как по поверхности соединения, так и с полным или частичным отрывом сварной точки. На поверхностях разрушения присутствовали очаги схватывания с развитым ячеистым рельефом и несваренные участки. Очаги схватывания и непровары располагались под следами зубьев и впадин сварочного наконечника, соответственно. Внедрение зубьев инструмента вызывало периодическое изменение нормальной деформации образцов как по величине, так и по знаку. В областях сжатия ЛПС превышала 80%, и преобладала бездефектные участки, в то время как в областях растяжения наблюдались несплошности, и ЛПС изменялась от 5 до 25%.

В зоне соединения формировались мелкие рекристаллизованные зерна. В прилегающих областях зерна вытягивались по направлению течения металла, что сопровождалось нарушением двойниковых разориентировок и формированием субструктуры.

Результаты работы показали, что, для получения соединений меди с линейной плотностью не менее 70% сжимающие деформации по всей площади сварной точки должны превышать 15%. Кроме того, необходимо обеспечить равномерное распределение сжимающих деформаций по контактной поверхности, что требует разработки, изготовления и апробации инструмента с соответствующим рельефом.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 22-19-00617. Микроструктурные исследования проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН "Структурные и физико-механические исследования материалов".

СТАБИЛЬНОСТЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ $Ni_{49,8}Ti_{50,2}$ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

И.З. Шарипов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

ilgizsh@mail.ru

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) системы Ni-Ti применяются для изготовления исполнительных и функциональных устройств в технике, в медицине и др. В этих устройствах используют однократный ЭПФ. Применение многократного или обратимого ЭПФ сдерживается тем, что он нестабилен при термическом циклировании, а также разрушением материала образца через некоторое число циклов.

Примером изменения свойств материала является «эффект тренировки» образца. Так в сплаве $Ni_{49,8}Ti_{50,2}$ при многократном прохождении фазового перехода величина ЭПФ возрастает в 8-10 раз.

Изменение величины ЭПФ естественным образом обусловлено изменениями в структуре материала. Исследования микроструктуры материала подтверждают тесную связь дилатации с текстурой сплава.

В связи с этим актуальным вопросом является получение большей стабильности структуры материала и соответственно обеспечение достаточного ресурса работы механизмов на его основе.

При фазовом переходе в процессе роста мартенситных зерен происходит деформация приграничных с ними областей, вследствие чего возрастает плотность дислокаций в кристаллах и их распределение. Многократное циклирование приводит к накоплению деформации в материале. При достижении критических значений, происходит его разрушение.

Для увеличения ресурса работы исполнительных механизмов на основе ЭПФ можно использовать два подхода: 1) уменьшить величину деформации на границах зерен при фазовом переходе, чего можно достичь, уменьшением размера зерен; 2) снизить величину деформации и внутренние напряжения отжигом или отпуском.

Первый подход был реализован созданием структур образцов прокаткой при разных температурах в диапазоне 470-870 К. Как показали микроструктурные исследования, при низких температурах прокатки формируется мелкозернистая структура, при более высоких – структура укрупняется. Измерения показали, что величина ЭПФ при этом составляла ~1% после сорока циклов и при этом мелкозернистая структура показывает большую стабильность.

Второй также может быть использован, отжиг позволяет снизить внутренние напряжения, однако при этом также снижается величина ЭПФ. Выбирая оптимальный режим термической обработки, можно во многих случаях добиться оптимального сочетания величины ЭПФ и ресурса работы материала.

Выбор того или другого метода решения, конечно зависит от конкретных условий поставленных технических задач.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА В ОБРАЗЦАХ АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННОЙ СТАЛИ

М. Писарев¹, В.А. Романова¹, Е.С. Емельянова¹, О.С. Зиновьева², Р.Р. Балохонов¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

²Университет Нового Южного Уэльса, Канберра, Австралия
pisarev@ispms.ru

Формирование деформационного рельефа в процессе нагружения материала представляет собой сложное явление, происходящее на микро-, мезо- и макроуровнях, и может являться индикатором внутреннего состояния материала. В связи с этим, актуальным становится исследование закономерностей формирования деформационного рельефа, возникающего на поверхности образца в процессе нагружения.

В данной работе экспериментально исследуется деформационный рельеф, возникающий на поверхности образца из нержавеющей стали 316L, изготовленного методом селективного лазерного плавления. Обе стороны образца были отшлифованы и отполированы, после чего одна из поверхностей была покрыта контрастом для анализа полей смещений и деформаций методом корреляции цифровых изображений, а на другую поверхность была нанесена разметка для регистрации профилограмм. Растяжение проводилось на испытательной машине BISS Nano 15 kN в соответствии с методикой нагружения с остановками при определенных степенях деформации.

Анализ методом корреляции цифровых изображений показал, что деформация происходила квазиоднородно и симметрично относительно центра образца до 30% растяжения, после чего начиналось постепенное формирование шейки в центральном сечении образца. Деформационный рельеф на поверхности рабочей части становился заметным уже на ранних стадиях пластического течения.

При деформации 5% и 35% поверхность рабочей части была проанализирована с использованием сканирующего профилометра NewView. Исследование профилей выявило сложную иерархически организованную структуру рельефа, включающую складки разного масштаба и ориентации. Уже при 5% деформации значительный вклад в деформационный рельеф поверхности вносили области интрузии и экструзии с характерными признаками мезоскопических рельефных образований. При деформации на уровне 35% рельеф становился еще более сложным: к уже сформировавшейся структуре добавлялись более мелкие продольные складки, ориентированные вдоль оси растяжения. Предполагается, что различные компоненты рельефа связаны с разными механизмами деформации, действующими на разных масштабных уровнях.

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 20-19-00600, <https://rscf.ru/project/20-19-00600/>